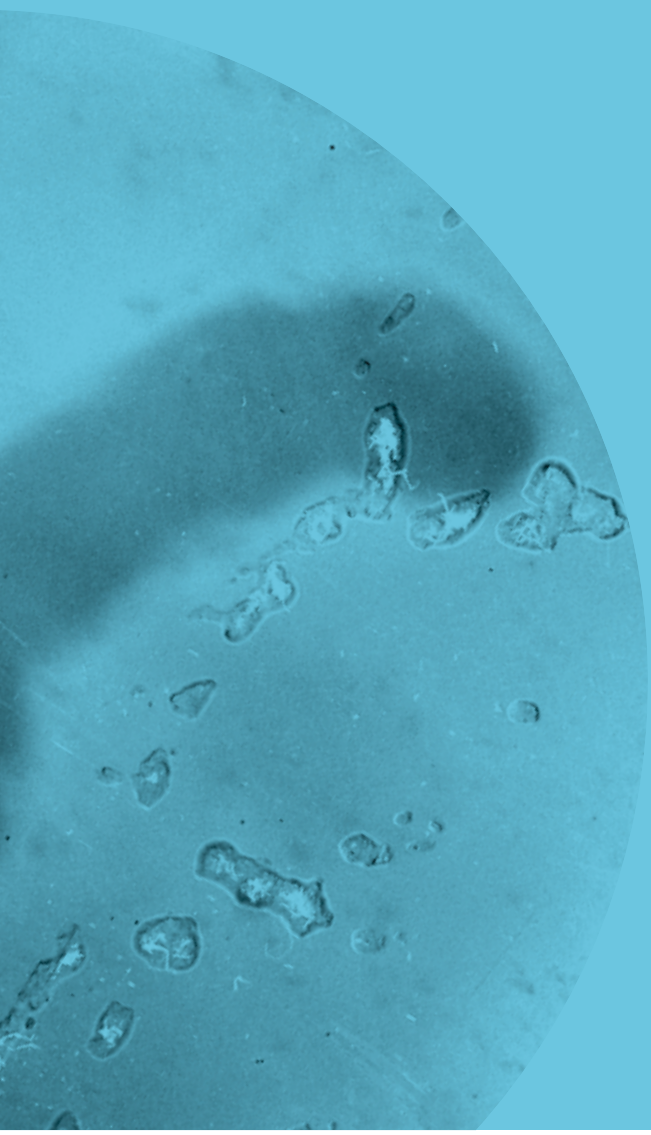




GIGANTES

PARA
VER
LO
DIMINUTO
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Giants to see the tiny
Electron microscopy

Catálogo de la exposición

Exhibition catalogue

GIGANTES PARA VER LO DIMINUTO

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Museo Nacional de Ciencia y Tecnología



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



MUNCYT
MUSEO NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA



Audioguía
Audioguide



Visita virtual
Virtual visit



GIGANTES PARA
VER
LO
DIMINUTO
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Giants to see the tiny
Electron microscopy

Créditos

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades

Ministra

Diana Morant Ripoll

Secretaría de Estado de Ciencia, Innovación y Universidades

Secretario de Estado

Juan Cruz Cigudosa García

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología

Directora General

Izaskun Lacunza Aguirrebengoa

Museo Nacional de Ciencia y Tecnología

Director

Fernando Luis Fontes Blanco

Comisariado científico

Pedro Amalio Serena Domingo

Juan de Dios Alché Ramírez

Coordinación

Rosa María Martín Latorre

Ignacio de la Lastra González

Equipo técnico

Joaquina Leal Pérez-Chao

Emilio José Bande Fuentes

Isabel Tarancón Santana

Marta Lestayo Ortega

Josefa Prados Barrera

Diseño expositivo

Jorge Ruiz Ampuero

Producción y montaje

Amazing up

Narraciones audiovisuales

B23 S.C.P.

Audioguía

Guidum y Aebia

Transporte

Tti - Técnica de Transportes Internacionales

Diseño y maquetación del catálogo

Studio Etérea

Impresión del catálogo

Advantia Comunicación Gráfica S. A.

Edita

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología

E-NIPO 151250165

NIPO 15125015X

DL M-17428-2025

Publicación incluida en el programa editorial de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del año 2025. Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado: <https://cpage.mpr.gob.es>

Agradecimientos

Arturo M. Baró Vidal
Carmen Prada Moral
Federico Rojo Todo
Javier Piqueras de Noriega
José Antonio Aznárez Candao
José López Carrascosa
José María Badía Pérez
José Ygnacio Pastor Caño
Josefa Jiménez Albarrán
Julio Gómez Herrero
Marina Alonso Riaño
Miguel Ángel Martínez González
Sergio Barbero Briones
Horacio Oliva Aldamíz, *in memoriam*

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Hospital Universitario 12 de Octubre
Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz
Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL)
Legado Cajal
Sociedad de Microscopía de España (SME)

Síguenos en

www.muncyt.es

✕ @muncyt

f facebook.com/muncyt

📷 @muncyt_es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



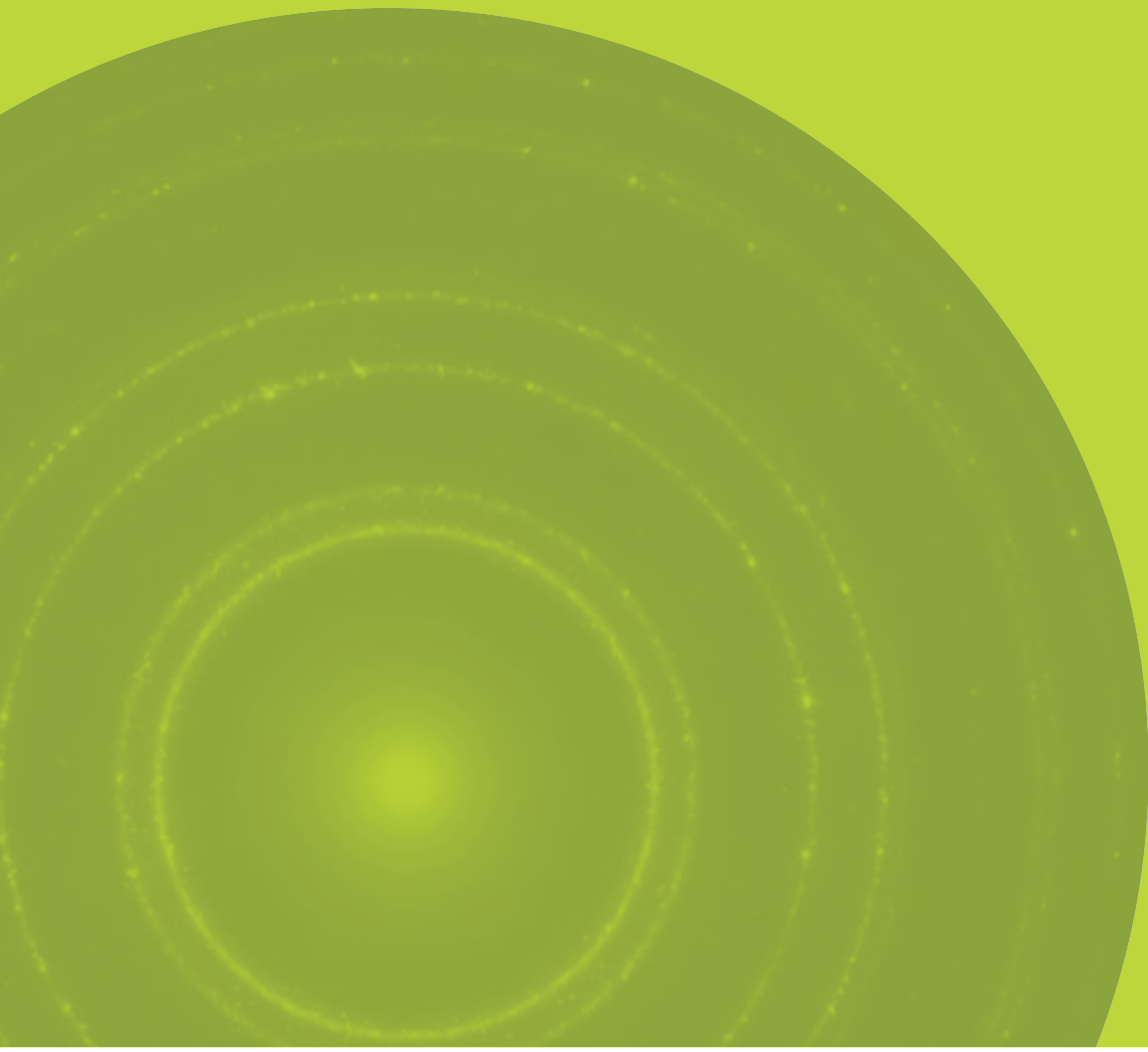
MUNCYT
MUSEO NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA



Índice

12	Presentación
18	La microscopía electrónica. Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica Juan de Dios Alché Ramírez y Pedro Amalio Serena Domingo
52	Viendo más allá de la luz: Los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica (1941-1964) Sergio Barbero Briones
77	Ocho décadas de microscopía electrónica en España Juan de Dios Alché Ramírez y Pedro Amalio Serena Domingo
108	La exposición
138	La colección
151	English version

Presentación



Casi todos tenemos en mente un estereotipo, un tópico, a la hora de representar a un científico o a una científica. Para la gran mayoría es un señor de edad madura, en bata blanca, con una gran melena cana hirsuta, gafas y un blanco bigote bien poblado. Este cliché probablemente tiene su origen en la imagen de Albert Einstein (1879-1955).

En la actualidad, afortunadamente, este tópico se está sustituyendo progresivamente por otras imágenes mentales, como la de una mujer joven, con bata de trabajo, con gafas protectoras y un matraz o una probeta en la mano. Sin embargo, para mí, esta representación idealizada es la de un hombre canoso, ralo de pelo, en bata blanca, sentado en una mesa con muestras y con el ojo en el ocular de un microscopio.

Esta imagen se debe a la omnipresencia, en los primeros años de mi vida, de mi abuelo materno, Andrés Blanco Loizelier (1917-2012), veterinario, microbiólogo e investigador. Por circunstancias vitales, tanto mi hermano como yo, nos criamos en gran parte con nuestros abuelos maternos. Mis padres eran muy jóvenes y delegaron bastante en mis abuelos la crianza de sus hijos para poder disfrutar más de su juventud, interrumpida, en parte, por una pronta paternidad. Eso no nos supuso un problema, sino todo lo contrario, ya que mi abuelo, que todavía era joven y activo durante nuestra infancia, entre otras muchas cosas, nos transmitió el amor por la naturaleza, los seres vivos, el arte, la cultura, los museos y la ciencia.

Los primeros museos que visité en mi vida, de ciencias naturales, fueron precisamente con mi abuelo. Aún hoy recuerdo como si fuera ayer entrar en el gran vestíbulo del Museo de Historia Natural de Londres de la mano de mi abuelo y ver el enorme esqueleto del diplodocus, apodado “Dippy” (ahora sustituido por el de una impresionante ballena azul colgada del techo), el corte del tronco de la secuoya gigante (*Sequoiadendron giganteum*), con sus marcas de tiempo en sus anillos de crecimiento, colocado en el rellano de la escalinata principal, o la vitrina con el celacanto (*Latimeria chalumnae*) en formol, un gran pez prehistórico de cuatro aletas y aspecto amenazante que se creía extinto hasta que se redescubrió vivo en Sudáfrica en 1938. Esa pasión por las ciencias

naturales, la cultura y los museos se prendió en mí durante aquellas visitas con mi abuelo y fueron el germen de lo que sería mi futura carrera profesional. Aún hoy entro en los museos y me entusiasmo con las maravillas que muestran con la misma pasión de ese niño.

Durante aquellos primeros años de mi vida, entre los 7 y 15 años aproximadamente, mi abuelo trabajaba en dos laboratorios, uno público, vinculado al Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y uno privado, financiado por un programa *Fulbright*, gracias a sus contactos con varias universidades y centros de investigación estadounidenses. Debido a esa relación, en 1982, sería nombrado miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York, uno de los muchos honores que recibió en vida. En aquella época, en la que compaginaba su trabajo científico desarrollando vacunas contra las enfermedades animales con la vida familiar, tuve la oportunidad de visitar varias veces los laboratorios en los que trabajaba, donde tenía cobayas y ratas para experimentación, alguno de los cuales fueron salvados de su cruel destino al ser adoptados como mascotas en casa. Aquellos laboratorios estaban equipados con microscopios y otros aparatos extraños para mí, como las máquinas de corte, los microtomos, con los que se hacían los delgados cortes histológicos de muestras previamente inmersas en parafina y tintadas. A veces, incluso, me sentaba en sus rodillas y me dejaba asomarme a los oculares para descubrir, maravillado, las cosas que se veían con ellos.

El campo de estudio de mi abuelo fue, sobre todo, el de las enfermedades aviares, aunque a veces le llegaban al laboratorio animales exóticos procedentes del zoológico o de importaciones más o menos legales, cuando eran portadores de alguna enfermedad. Recuerdo especialmente sus investigaciones con la toxina botulínica, producida por el *Clostridium botulinum*, cuando me mencionaba que solo unos gramos podrían matar a una ciudad entera tan grande como Madrid, o con la psitacosis u ornitosis, producida por la *Chlamydophila psittaci*, cuando nos advertía seriamente de que no nos acercáramos ni en broma a los loros y las cotorras. Precisamente en clamidiosis llegó a ser una autoridad mundial y tuve el enorme privilegio de ser el ‘corrector y editor’ de su último artículo

científico: “*Coriomeningitis Clamidal: una enfermedad autoinmune*”, publicado en los Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de 2003.

Con un abuelo así no es de extrañar que desde pequeño desarrollara una pasión por las ciencias naturales, especialmente por la zoología, que alimentaba, no solo a base de devorar libros, sino con la “experiencia de campo” en la casa que mis abuelos tenían en la sierra de Madrid. Allí monté mi primera colección de mariposas e insectos y allí también hice mis primeras excavaciones arqueológicas y paleontológicas en las que apenas lograba encontrar un hueso de pollo o un trozo de tiesto, pero cuya metodología por cuadrículas y contextos trataba de ser lo más científica posible.

Sin embargo, el momento más emocionante de mi etapa como aprendiz de naturalista llegó con la adolescencia, cuando mi abuelo me regaló el viejo microscopio Ernst Leitz Wetzlar con el que él había comenzado su trayectoria profesional. Junto con el microscopio me regaló un juego completo de muestras preparadas, portas y cubres y Bálsamo de Canadá para preparar mis propias muestras. Aún recuerdo la tremenda ilusión con la que recibí aquel regalo. Un microscopio “de verdad”, con varios juegos de lentes y cientos de aumentos, que no tenía nada que ver con los microscopios de juguete con los que se iniciaban los niños de entonces en el conocimiento del “micromundo”.

Aquel microscopio, hoy donado al Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, y parte de la muestra que aquí presentamos, me produjo innumerables momentos de asombro y placer asociado al descubrimiento de lo diminuto. En aquella época vivía con mi familia en Málaga y recuerdo hacer expediciones al jardín para recoger plantas, semillas, agua sucia, insectos y pequeños objetos para observarlos bajo los oculares de mi microscopio. Lo más emocionante era observar los protozoos y las pequeñas formas de vida que podían habitar en una gota de agua recogida de un charco, especialmente en otoño, cuando se infusionaba con hojas. No es difícil imaginar la sorpresa que debieron sentir Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), Robert Hooke (1635-1703) y todos los que llegaron tras ellos al abrir las puertas a ese nuevo mundo de lo “micro”.

Tras los oculares fui descubriendo con aquel microscopio esa “terra incógnita”, ese mundo que nos rodea y que existe más allá de las limitaciones de nuestra propia vista. Las lentes más potentes, de mil aumentos, eran de inmersión y tenían que sumergirse en aceite de cedro para obtener la máxima resolución posible. Hasta ese límite llegaba mi microscopio y prácticamente la microscopía óptica del momento. En aquella época mi abuelo ya me había hablado de la microscopía electrónica y sus enormes posibilidades. Aunque nunca llegué a asomarme a uno de esos microscopios, me maravillaba ver las imágenes que se obtenían con ellos, algunas publicadas en tres dimensiones y a todo color en el *Muy Interesante* o en el *National Geographic*, dos de mis revistas de cabecera de ese momento.

Por todo esto cuando el equipo técnico del museo me propuso, a mediados del 2022, que nuestro próximo proyecto expositivo temporal fuera sobre la microscopía electrónica y mostrara los primeros equipos que llegaron y se usaron en España, celosamente conservados en la colección permanente del MUNCYT, inmediatamente di luz verde al proyecto y nos pusimos manos a la obra.

De la mano del entregado equipo técnico del museo y de los dos entusiasmados comisarios, Pedro Serena, físico e investigador científico del Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC de Madrid y especialista en nanotecnología, y Juan de Dios Alché, biólogo, responsable científico del Servicio de Microscopía (CTEM) de la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC) y jefe del Departamento de Bioquímica, Biología Celular y Molecular de Plantas de la EEZ-CSIC, además de presidente de la Sociedad de Microscopía de España y experto en pólenes, aprendí los fundamentos físicos de la microscopía electrónica, el llamado haz de electrones. También aprendí a diferenciar los equipos TEM de los SEM (según sean de transmisión o de barrido y produzcan o no imágenes tridimensionales) y los microscopios de efecto túnel (STM) que usan un fenómeno cuántico para obtener asombrosas imágenes a nivel atómico.

La microscopía electrónica significó, a mediados y finales del s. XX, la misma revolución científica que había significado la microscopía óptica a mediados del s. XVII. Gracias a los microscopios electrónicos se logró vencer las barreras

impuestas por las lentes y los fotones para adentrarnos en el mundo que estaba por debajo de los 200 nm o límite de Abbe, el mundo de las moléculas y los virus, y luego en el mundo atómico, desarrollando nuevas ramas de la ciencia como la virología, la palinología, la nanociencia y la nanotecnología.

Conocer los principios físicos, la evolución, los descubrimientos y las utilidades de la microscopía electrónica es el objetivo de esta muestra. Quizá una de las frases más famosas atribuida a Isaac Newton (1643-1727) para reconocer la importancia del trabajo previo de los científicos que le precedieron fue «Si he logrado ver más lejos ha sido porque he subido a hombros de gigantes» se podría adaptar aquí por *“Si he logrado ver lo diminuto, lo muy pequeño, ha sido a hombros de estos gigantes”*.

Fernando Luis Fontes Blanco

Director del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología

La microscopía electrónica

Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica

Juan de Dios Alché Ramírez

Investigador Científico. Estación Experimental del Zaidín (EEZ). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Pedro Amalio Serena Domingo

Investigador Científico. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Preámbulo

La intención del presente artículo no es la de realizar una revisión exhaustiva del origen, desarrollo, aplicaciones y futuro de la microscopía electrónica, sino la de proporcionar suficiente información para que el público que recorra la exposición “Gigantes para ver lo diminuto. Microscopía electrónica” pueda contextualizar sus contenidos. Este artículo introductorio se acompaña de otros dos, uno centrado en la adquisición, uso e impacto del primer microscopio electrónico instalado en España (Barbero, 2025), y otro que relata aspectos relevantes sobre la implantación y el desarrollo de la microscopía electrónica en nuestro país (Alché y Serena, 2025).

Los contenidos del presente artículo reflejan solo una pequeñísima parte del desarrollo científico y tecnológico que ha sido impulsado por decenas de miles de personas y con el que se ha conseguido una ingente cantidad de conocimientos que han permitido ampliar nuestra visión del mundo. Si se realiza en Google Scholar una búsqueda de los artículos relacionados con el desarrollo o uso de las diferentes familias de microscopios electrónicos nos encontramos con más de diez millones de documentos. Es imposible resumir en unas cuantas páginas el desarrollo de una de las grandes aventuras de la ciencia del último siglo, pero intentaremos dar unas pinceladas con las que esbozar los principales hitos conseguidos.

En este artículo, los lectores y lectoras realizarán un itinerario cercano al de la exposición: comienza con la microscopía óptica; prosigue adentrándose en el contexto de revolución científica permanente y acelerada en el que vivimos desde finales del siglo XIX, deteniéndose en el descubrimiento del electrón con toda su repercusión científica y tecnológica; continúa con la invención y desarrollo del microscopio electrónico y de sus diferentes variantes, así como su impacto en la ciencia y la tecnología; y finaliza con los desafíos que deben afrontar todas estas técnicas para seguir mejorando nuestra comprensión de la materia a escala atómica.

Deseamos que el artículo extraiga la esencia de este vasto recorrido, con el fin de satisfacer momentáneamente la curiosidad del lector o de la lectora, de valorar los logros alcanzados por las generaciones precedentes, y lograr que se sienta cómplice del esfuerzo realizado por la actual para continuar con la apasionante e inacabable aventura de la generación de conocimiento.

Más allá de nuestra vista

El ser humano ha sentido siempre una curiosidad natural que le induce a captar informaciones, en muchos casos sutiles, que le permiten describir y entender su ambiente circundante y los procesos que en él ocurren. Este conocimiento ha utilizado primigeniamente como herramientas los órganos sensoriales humanos con sus elevadas capacidades, por una parte, pero con sus grandes limitaciones, por otra. De todos nuestros sentidos, la vista es quizás el más evolucionado, capaz de combinar sensores especializados con nuestro sistema nervioso, configurado para albergar e interpretar la cantidad ingente de información obtenida.

Una parte de la ciencia ha estado relacionada con nuestro afán por conocer lo pequeño e invisible que tenemos a nuestro alcance, así como lo grande y lejano que conforma el cosmos. En ambas situaciones límite, los objetos de interés se escapan a las posibilidades de nuestra vista. Por ejemplo, nuestros ojos no pueden discernir el espacio entre dos objetos si este es inferior a unos 0,2 mm. Para lograr explorar lo muy pequeño se construyeron microscopios ópticos, mientras que se concibieron telescopios para lo muy lejano. En ambos casos se buscaba la amplificación de las imágenes de los objetos mediante el uso de lentes fabricadas normalmente con vidrio. La calidad de la imagen se ve afectada por lo que se denominan aberraciones ópticas; mejorar aquella implica disminuir dichas

aberraciones. La fabricación de sistemas de lentes con aberraciones ópticas controladas fue, y aún sigue siéndolo en nuestros días, una tecnología clave para el desarrollo de técnicas avanzadas de microscopía, tales como la microscopía confocal, la observación de especímenes gruesos, la microscopía de superresolución u otras.

Entre los primeros artefactos ópticos utilizados para obtener una magnificación en las imágenes se encuentran las esferas de vidrio rellenas de agua, presentes en la Antigüedad greco-latina, y, posteriormente, las llamadas “piedras de lectura”, lentes plano-convexas. En la Edad Moderna surgieron los primeros sistemas compuestos por dos (dobletes) o más lentes, que permitían corregir algunas aberraciones, mejorando la calidad de la imagen observada. De esta manera, tuvieron cierta profusión los microscopios simples de Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), considerado el “padre de la microbiología”, basados en microesferas de vidrio incrustadas en placas metálicas. El mismo van Leeuwenhoek fue el primero en comunicar el descubrimiento de los microorganismos en 1676, redescubriendo además los glóbulos rojos y los espermatozoides. Sin embargo, los microscopios ópticos compuestos acabaron imponiéndose: el propio Galileo Galilei (1564-1642), ideó uno como adaptación de un telescopio, aunque Zacharias Janssen (1585-1632) es considerado el inventor

del microscopio compuesto. Cabe destacar la contribución de los primeros naturalistas en la utilización del microscopio, entre los que sobresalieron Marcello Malpighi (1628-1694), considerado el padre de la histología, al observar tejidos vivos en el microscopio, y Robert Hooke (1635-1703), autor de la impresionante “Micrographia” publicada en 1665 (Hooke, 1665). En esta obra se ilustran y analizan innumerables muestras, sobresaliendo entre todas ellas las primeras estructuras denominadas “células”, observadas en láminas de corcho. La Fig. 1 muestra una de las ilustraciones de esta obra.

Durante los siglos XVIII y XIX se observa un co-desarrollo de la microbiología y la microscopía. A través de una búsqueda incesante de los fundamentos de la vida y gracias a las observaciones realizadas por numerosos científicos se llega a fundamentar la teoría celular, que sería formulada años más tarde (1839) conjuntamente por Theodor Schwann (1810-1882), histólogo y fisiólogo, y Matthias Jacob Schleiden (1804-1881), botánico.

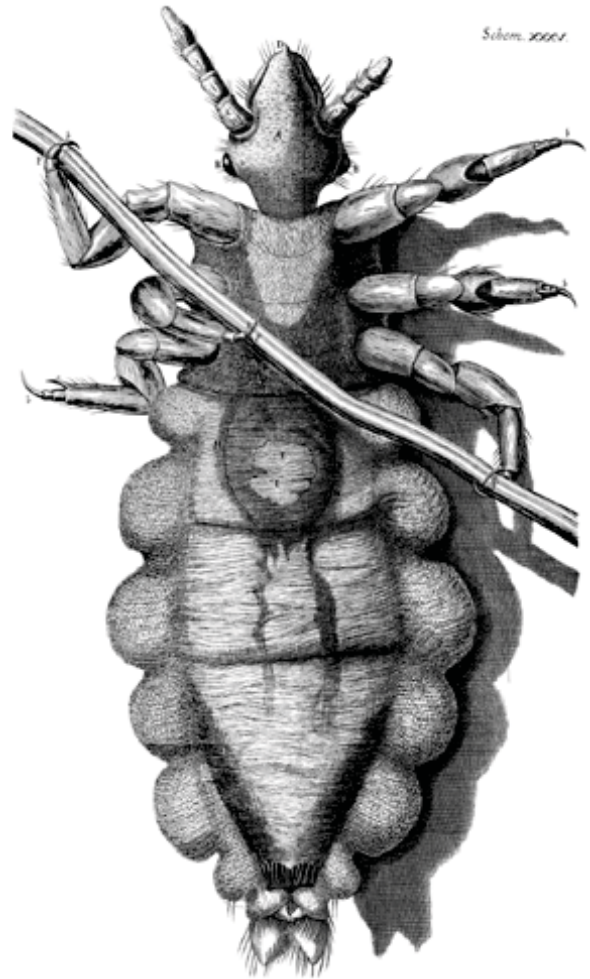


Fig. 1

Esquema de un piojo,
“Micrographia”, Robert
Hooke, 1667. Dominio público.
Wikimedia Commons.

Observando el micromundo

La obtención de la imagen aumentada de una determinada muestra requiere el manejo de haces de luz, formados por numerosos rayos, mediante el uso de lentes y espejos, siguiendo las leyes de la óptica geométrica. Estos elementos desvían la dirección del haz de luz procedente de la muestra con la finalidad de focalizarlo sobre una región, de tal manera que se consigue una imagen magnificada de la misma. Los microscopios ópticos (usaremos de ahora en adelante el acrónimo MO para referirnos a los mismos), evolucionaron rápidamente desde una concepción sencilla hasta llegar a ser equipos de gran sofisticación.

Los MO poseen dos tipos de elementos claramente diferenciados: elementos mecánicos y elementos ópticos; aunque en la actualidad se han añadido los elementos electrónicos p. ej. detectores, fuentes de iluminación, etc.– como componentes esenciales. Durante su evolución primigenia, tanto los elementos ópticos como mecánicos fueron mejorando continuamente. Algunos de estos cambios fueron: 1) la utilización de nuevos materiales para la construcción de los soportes del microscopio (estativos) que aportaban mayor estabilidad; 2) la sustitución del desplazamiento del tubo óptico por el de la propia platina (soporte donde se coloca la muestra); 3) el diseño de microscopios binoculares; 4) la incorporación del revólver giratorio que facilita el cambio de objetivo en la estructura de los microscopios; 5) la utilización de elementos para controlar la iluminación del sistema

(lentes condensadoras, diafragma de campo, etc.); y 6) el uso de objetivos de inmersión. La Fig. 2 muestra las partes de un MO actual.

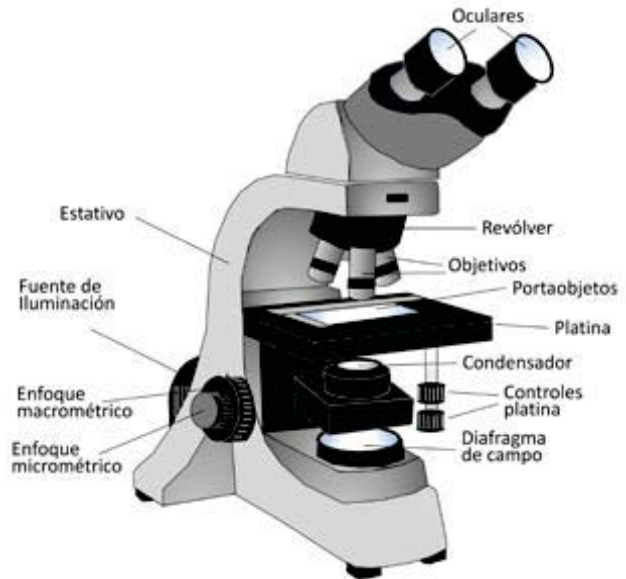


Fig. 2

Microscopio óptico actual de tipo binocular, con sus partes fundamentales. Cortesía del Dr. Juan de Dios Alché Ramírez.

En cuanto al sistema óptico, inicialmente los esfuerzos se centraron en incrementar la magnificación de la imagen y mejorar su calidad disminuyendo las aberraciones ópticas mediante mejores diseños (forma y configuración del sistema de lentes) y

procedimientos de fabricación. Las aberraciones ópticas son distorsiones causadas por un sistema óptico que dan lugar a imágenes poco nítidas o alteradas. Estas aberraciones son de distintos tipos. Entre las que más afectan a la calidad de la imagen están la aberración cromática, la esférica y el coma. La aberración cromática se produce porque el vidrio óptico modifica los haces de luz de manera diferente en función de los diversos colores (asociados con diferentes longitudes de onda) que componen la luz blanca. Esto se debe a que la “densidad óptica” del medio (índice de refracción) depende de la longitud de onda. La aberración esférica se produce porque la desviación de la trayectoria de un rayo de luz depende de si el rayo atraviesa la lente por su parte central o por su parte periférica. El coma es una aberración debida a la incidencia de rayos fuera de eje, esto es, aquellas zonas de la muestra que no están alineadas con el eje óptico del microscopio. Otras aberraciones ópticas de menor influencia en los microscopios son el astigmatismo, la curvatura de campo y la distorsión. La evolución del MO ha venido condicionada por el avance en las técnicas que permiten disminuir estas aberraciones hasta llegar a sistemas en los que la calidad de la imagen ya no está limitada por estas sino por otro tipo de defectos, denominados difractivos, como veremos más adelante.

Por otro lado, se inventaron y desarrollaron formas de preparar y tratar las distintas muestras para que estas

exhibieran máxima resolución y contraste. Muchas muestras podían ser observadas directamente “en fresco” de forma inmediata a su obtención y sin necesidad de preparaciones adicionales. Tal es el caso de los fluidos (sangre, orina), cultivos bacterianos, organismos unicelulares, epidermis, secciones de tejidos, etc. Frecuentemente, los tejidos y células debían ser preservados a fin de que su estructura se mantuviera intacta durante su observación y, en algunos casos, tras la misma. Esta preservación se denomina fijación, y puede ser llevada a cabo mediante métodos tanto físicos (por ejemplo, la congelación) como químicos, mediante mezclas de componentes que, por una parte, matan las células, pero preservan su estructura morfológica y/o química, por otra. La observación microscópica de especímenes de tamaño grueso llevó al desarrollo de técnicas de inclusión en diferentes medios entre los que destacó la parafina y a la generación de finas secciones, con el diseño de equipos auxiliares como los micrótomos. Los especímenes a observar comenzaron a ser tratados con diferentes productos para incrementar su contraste. Concretamente, se utilizaban colorantes y/o sustancias capaces de unirse de manera más o menos específica a estructuras del tejido aportándoles color y contraste.

Todas estas mejoras en los diseños de sistemas ópticos y mecánicos, así como en la preparación de las muestras, parecían ofrecer un desarrollo ilimitado

de la microscopía óptica hasta niveles inconcebibles, aunque se llegó a la conclusión de que la capacidad de distinguir detalles pequeños mediante sistemas de lentes tenía limitaciones insuperables. Nace así el concepto de poder de resolución (PR), o resolución óptica de un sistema, definido como su capacidad de poder distinguir dos puntos u objetos de la imagen. Esta definición fue propuesta por Ernst K. Abbe (1840-1905) en su teoría sobre los límites de la resolución, publicada en 1873. La teoría de Abbe se fundamentaba en la concepción ondulatoria de la luz, superando los modelos de propagación de rayos de la óptica geométrica. Las ondas de luz interfieren entre sí produciendo variaciones en la intensidad de luz en la imagen, lo cual disminuye la capacidad de formar imágenes fieles a la muestra. Además, estas interferencias aumentan cuando la propagación de la luz es obstaculizada por bordes u otro tipo de estructuras que tienen tamaños similares a la longitud de onda, fenómeno denominado difracción. La teoría de Abbe relaciona mediante una fórmula el poder de resolución (PR) con la longitud de onda de la fuente de luz utilizada (λ) y la apertura numérica (AN) del objetivo utilizado. La apertura numérica es, a su vez, un parámetro adimensional directamente proporcional al índice de refracción del material del que está hecha la lente y al seno del ángulo máximo de aceptación del haz de luz que puede entrar o salir de la lente. En la Fig. 3 se muestran las diferentes variables que determinan el poder de resolución.

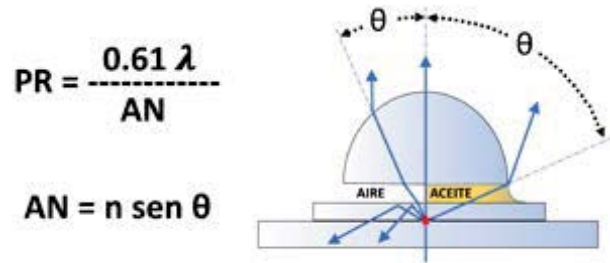


Fig. 3

Fórmula del poder de resolución (PR) y de la apertura numérica (AN) de un microscopio óptico, junto con el diagrama del recorrido de los rayos de luz en un objetivo seco o de inmersión en aceite (figura de la derecha). El ángulo de aceptación de la lente está representado por θ . La longitud de onda de la luz utilizada está representada por λ , mientras que 0.61 es una constante. El índice de refracción (n) del medio entre la muestra y el objetivo es 1.0 en caso de ser aire, mientras que en otras sustancias puede llegar hasta 1.5.

El MO, pues, posee unas limitaciones fundamentales debido a la longitud de onda de la luz visible, que toma valores entre 400 y 700 nm, y al medio de inmersión utilizado, que permite controlar la apertura numérica. En el mejor de los casos, el poder de resolución del MO puede llegar a los 200 nm. Esto implica que detalles con tamaños inferiores a este tamaño 200 nm no se pueden observar con un MO, lo que impone un límite insuperable para la microscopía óptica.

El esplendor de la microscopía óptica: el ejemplo de Santiago Ramón y Cajal

La microscopía óptica entró en su apogeo durante el último tercio del siglo XIX y la primera mitad del XX. En este periodo también se desarrollaron otras importantes contribuciones técnicas, que incluyeron la invención de métodos para incrementar el contraste especialmente en el caso de las muestras biológicas, por lo general transparentes y con un gran contenido de agua. También a finales del siglo XIX se construyó el microscopio petrográfico diseñado por Camille S. Nachet (1801-1881). Ya entrados en el siglo XX nació la microscopía de contraste de fases, inventada por Frits Zernike (1888-1966), el condensador de campo oscuro, inventado por Henry W. F. Siedenhoff (1872-1940) y la microscopía de contraste interferencial diferencial (DIC) diseñada por Georges Nomarski (1919-1997).

Entre los investigadores españoles de esa época destaca especialmente Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), que ganó la cátedra de Anatomía Descriptiva de la Facultad de Medicina de Valencia en 1882, para posteriormente ocupar cátedras en la Universidad de Barcelona (1887) y en la Universidad Central de Madrid (1892). Cajal sistematizó el protocolo de impregnación argéntica (“reazione nera”), diseñado inicialmente por Camillo Golgi (1843-1926), para el estudio del sistema nervioso, describiendo fielmente su estructura y demostrando la independencia de sus

elementos celulares (luego llamados neuronas). Cajal estudió el sistema nervioso de muchos vertebrados, descubriendo las pirámides dendríticas y postulando la existencia de la discontinuidad sináptica. A la calidad investigadora de Cajal se unió su capacidad artística (De Felipe, 2005), que nos legó numerosas y detalladas ilustraciones de sus estudios como muestra la Fig. 4.

Sobre las observaciones e interpretaciones de Cajal se construyó la teoría neuronal, en contraposición a la teoría reticular defendida por Golgi. Por dicha teoría Cajal recibió el Premio Nobel en 1906, aunque compartido con Golgi. Por entonces Cajal ya era uno de los líderes indiscutibles de la ciencia española, siendo el creador de una escuela de histología y neurología que se ha proyectado hasta la actualidad. La vida y la obra de este eminente investigador han sido recogidas en numerosas biografías (Larriba, 2020; Cánovas, 2021; Sanz Serrulla, 2022).

Además de su capacidad investigadora, Cajal destacó por su talento como maestro en las actividades de investigación, y como divulgador de la ciencia. Su peso en la ciencia española va más allá de sus investigaciones y descubrimientos, ya que estuvo al frente de la Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE) desde su creación, siendo esta institución una pieza

clave en el proceso de incorporación de España a las corrientes científicas y tecnológicas de los países más avanzados. Al mando de la JAE, Cajal impulsó la creación de un sistema de pensiones (becas) que permitía ampliar la formación de investigadores prometedores o consolidados en prestigiosos grupos de investigación extranjeros, creando una extensa red de conexiones científicas. Estos investigadores a su regreso se fueron reincorporando a institutos de investigación de nueva creación, nutriendo de esta forma el sistema de investigación del país. Se volverá a tratar este asunto en el tercer artículo curatorial del presente catálogo (Alché y Serena, 2025).

Conviene destacar que el año 2022 fue declarado por el Gobierno de España como el “Año de Investigación Ramón y Cajal”. Se trata de un acontecimiento especial de interés público, que se extendió hasta el 31 de mayo de 2025, con el que se conmemoró la personalidad científica más importante de la historia de España.

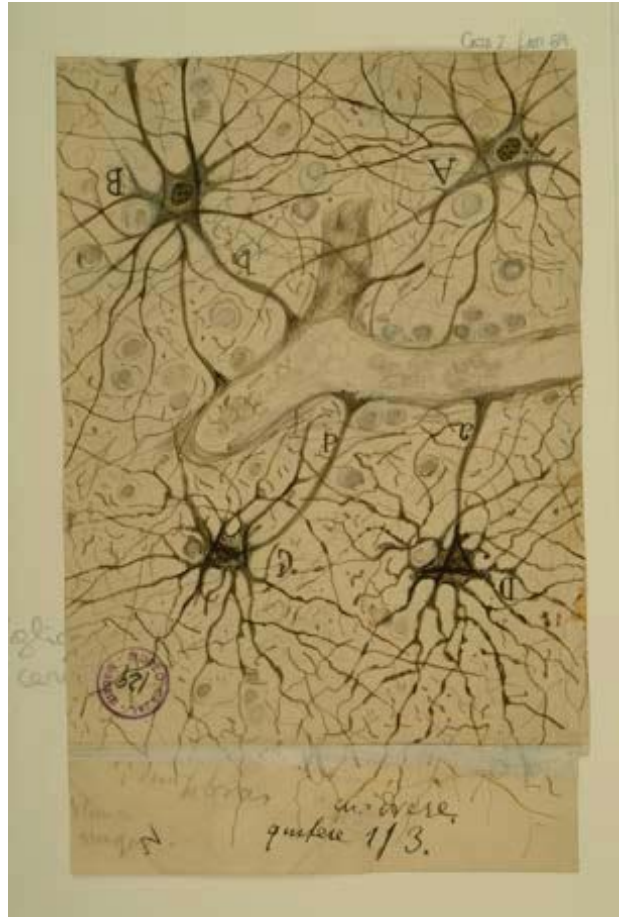


Fig. 4

Ilustración realizada por Santiago Ramón y Cajal de un grupo de células neuróglías de la sustancia blanca del cerebro. Imagen número 11346 procedente del Legado Cajal (CSIC).

El electrón entra en escena

A lo largo de los siglos XVIII y XIX se produjeron innumerables avances en todas las disciplinas científicas dando lugar, en muchos casos, a innovadores desarrollos tecnológicos. Por citar unos pocos ejemplos podemos mencionar el asentamiento de las leyes de la química, la propuesta de la tabla periódica de los elementos, la teoría celular o la formulación de la teoría del electromagnetismo. La ciencia y la tecnología comenzaban a modelar una nueva sociedad.

Uno de estos avances, quizás poco llamativo, tuvo lugar en 1850, cuando Heinrich Geissler (1815-1879), físico alemán experto en el manejo del vidrio, fabricó un tubo de este material (llamado tubo de descarga) en cuyo interior se podía aplicar una diferencia de potencial entre dos electrodos. Al aplicar altos voltajes en tubos que contenían gases a muy baja presión (gases enrarecidos), líquidos conductores o metales ionizables, se observaba la emisión de una luz con un color característico para cada sustancia. Descomponiendo esta luz mediante un prisma o una red de difracción se visualizaba el espectro de emisión de la sustancia, que permitía su identificación. Este hallazgo supuso el inicio de la espectroscopía, herramienta fundamental en la química moderna.

Los tubos de vidrio también comenzaron a usarse en otro tipo de experimentos. En 1858 se descubren

los rayos catódicos por el científico alemán Julius Plücker (1801-1868), quien acuñó este nombre para la extraña radiación emitida por el cátodo de un tubo de descarga, que se observaba cuando en dicho tubo se practicaba el mejor vacío posible. Más adelante, el químico inglés William Crookes (1832-1919) desarrolló los tubos que llevan su nombre, diseñados para estudiar esta nueva radiación (Fig. 5). Destacan en esa época los trabajos sobre los rayos catódicos del físico alemán Johann W. Hittorf (1824-1914) y del húngaro Philipp E. A. von Lenard (1862-1947). Este último recibió el premio Nobel de Física en 1905. En 1895 se descubren los rayos X, también usando tubos de vacío, por el físico alemán Wilhelm C. Roentgen (1845-1923), quien recibió el Premio Nobel de Física en 1901. Fue en 1897 cuando el físico británico Joseph John Thomson (1856-1940) logró identificar la naturaleza de los rayos catódicos, determinando que estaban formados por partículas muy ligeras cargadas negativamente. Dichas partículas, poco después, fueron denominadas electrones. Thomson recibió en 1906 el Premio Nobel de Física (Sánchez Ron, 1997). Los tubos de vidrio, tan simples en su concepción, fueron indispensables para realizar avances científicos de gran importancia.

Los nuevos hallazgos, como la emisión espectral o el electrón, tuvieron que incorporarse a los modelos atómicos de la materia. Aunque la teoría

atómica se remonta a la Grecia Clásica, su versión moderna fue cobrando forma a lo largo de los siglos XIX y XX, sucediéndose modelos atómicos cada vez más sofisticados como el propuesto por el inglés John Dalton (1766-1844), el formulado por el propio Thomson o el modelo “planetario” del físico neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) (Challoner, 2019). En todos estos modelos los átomos se concebían como entidades tan diminutas que escapaban a la capacidad de observación de los MO. Sin embargo, su presencia era detectable de forma indirecta, como propuso en 1905 el físico alemán Albert Einstein (1879-1955) en su explicación del movimiento browniano.

Mientras que espectros, rayos X, rayos catódicos, y electrones cobraban protagonismo, se comenzaron a fraguar un par de revoluciones científicas, que surgieron de la necesidad de explicar algunos fenómenos que no encajaban en el marco clásico de la ciencia. En 1905, Einstein formuló la teoría de la relatividad restringida o especial, con el antiintuitivo postulado de la constancia de la velocidad de la luz en todos los sistemas inerciales de referencia, lo que requiere una reinterpretación del espacio y del tiempo, así como la equivalencia entre masa y energía. Por otro lado, con un desarrollo temporal más extenso, apareció la mecánica cuántica con los trabajos pioneros del científico alemán Max Planck (1858-1947) y del propio Einstein, y que tiene su apoteosis en las formulaciones de Werner Heisenberg (1901-1976) y Erwin Schrödinger (1887-1967) (Sánchez Ron, 2000; Miret, 2015).

La mecánica cuántica lleva asociada una sorprendente fenomenología, como el “efecto túnel”, que explica cómo una partícula puede superar una barrera de potencial cuando no posee la energía suficiente para hacerlo desde el punto de vista clásico. Otro llamativo aspecto de la mecánica cuántica es el principio de dualidad onda-corpúsculo, postulado en 1924 por Louis De Broglie (1892-1987), que establece que los corpúsculos de materia presentan simultáneamente propiedades características de las partículas y de las ondas. De esta forma, una partícula con un momento lineal p (que se obtiene clásicamente multiplicando la masa de la partícula m por su velocidad v) tiene asociada una onda de materia cuya longitud de onda es $\lambda = h/p$, siendo h la constante de Planck, que toma un valor extremadamente pequeño $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s. Einstein, en sus trabajos sobre la interacción entre luz y materia, ya había propuesto la existencia de los fotones, como entidades corpusculares vinculadas a las ondas electromagnéticas, pero la hipótesis de De Broglie iba más allá, asociando ondas de materia a cualquier partícula. Su postulado fue confirmado en 1927 por los físicos estadounidenses Clinton J. Davisson (1881-1958) y Lester H. Germer (1896-1971). Una de las consecuencias del postulado de dualidad onda-corpúsculo es la posibilidad de diseñar instrumentos que utilicen las propiedades ondulatorias de la materia en lugar de utilizar ondas electromagnéticas como la luz o los rayos X.

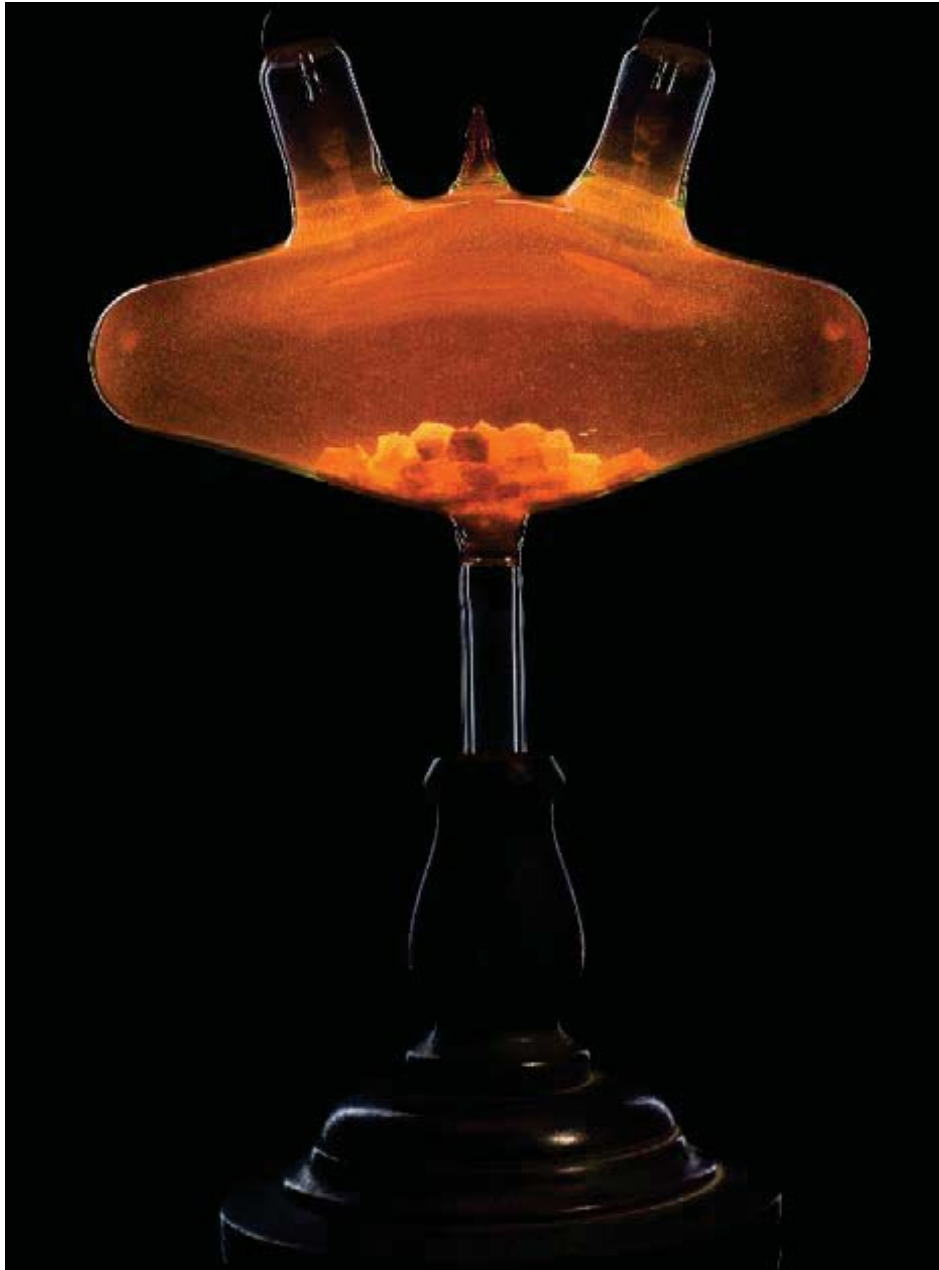


Fig. 5

Tubo de Crookes con mineral.
1930-1950. Laboratorio
Eléctrico Sánchez. Depósito
de los nietos de Mónico
Sánchez Moreno. Museo
Nacional de Ciencia y
Tecnología. Número de
inventario: DO2010/4/88.
Imagen: Yolanda Villaverde

La invención del microscopio electrónico

Desde una perspectiva tecnológica, la irrupción de la electricidad y la posibilidad de manipular flujos de electrones provocaron un cambio radical en la vida de los seres humanos. Además de usar las corrientes eléctricas para transportar energía con la que iluminar espacios y mover máquinas y vehículos, la manipulación de los electrones en los tubos de rayos catódicos también dio lugar a la disciplina que después se conoció por electrónica y cuya vertiginosa evolución, pasando de los dispositivos de vacío a los basados en semiconductores, nos ha permitido crear la sociedad digital en la que vivimos.

La electrónica basada en dispositivos de vacío se desarrolló en unas cuantas décadas, repletas de hitos y hazañas. En 1883, el físico alemán Heinrich R. Hertz (1857-1894) logró modificar la dirección de los rayos catódicos mediante campos eléctricos y magnéticos. Más adelante, el físico alemán Emil Johann Wiechert (1861-1928) logró la focalización de los haces de electrones mediante la aplicación de un campo magnético axial. Por su parte, el físico alemán Karl Ferdinand Braun (1850-1918) desarrolló en 1897 un sistema de visualización de haces de electrones basado en un tubo de rayos catódicos con deflexión magnética. Su invento, denominado “tubo de Braun”, fue el origen de los osciloscopios y de los monitores de rayos catódicos (CRT, del término inglés *Cathode Ray Tube*). Braun recibió en 1909 el Premio Nobel de Física.

Ya iniciado el siglo XX, en 1903, el físico alemán Arthur Wehnelt (1871-1944) desarrolló un dispositivo (cilindro Wehnelt) con el que construir cañones de electrones y un año más tarde desarrolló cátodos metálicos recubiertos de óxidos que producían potentes emisiones de electrones, ampliando el espectro de sus posibles aplicaciones tecnológicas. En 1904, el ingeniero británico John A. Fleming (1848-1945) registró la patente de un diodo o válvula termoiónica, capaz de funcionar como un rectificador, es decir, un dispositivo que transforma la corriente alterna en corriente continua. Dos años después Lee de Forest (1873-1961) diseñó las válvulas electrónicas de tipo triodo. Cátodos, cañones de electrodos, pantallas de fósforo, triodos, rectificadores, pentodos, etc. permitieron el diseño y la fabricación de numerosos equipos e instrumentos a lo largo de la primera mitad del siglo XX, como emisores y receptores de radio, amplificadores de señales, osciloscopios, células fotoeléctricas, televisiones o los primeros ordenadores (Thrower, 2005). La humanidad entró en la era de la electrónica.

Es interesante señalar la relevancia que tuvo Alemania en muchos de estos desarrollos debido al importante papel que tenía (y sigue teniendo) su sólido sector industrial. En particular, muchos avances de la física y de la electrónica de la época fueron incentivados y asimilados rápidamente por empresas como Siemens & Halske o Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG) fundadas en Berlín en 1847 y 1883, respectivamente.

En 1926, en este contexto de codesarrollo de la ciencia y la tecnología, Hans Busch (1884-1973) demostró teóricamente la posibilidad de focalizar haces de electrones sobre regiones muy pequeñas usando lentes magnéticas formadas por bobinas. De esta manera se establecía una analogía entre las lentes ópticas y su efecto sobre los haces de luz, y las lentes electromagnéticas (sistemas capaces de crear campos eléctricos y/o magnéticos) y su efecto sobre los haces de electrones. En la Universidad Técnica de Berlín, Ernst Ruska (1906-1988), un joven físico incorporado al equipo del ingeniero Max Knoll (1897-1969), comenzó a trabajar en el diseño de osciloscopios de gran sensibilidad y rápida respuesta.

Knoll y Ruska, tras conocer las ideas de Busch, deciden desarrollar lentes capaces de concentrar haces de electrones para su aplicación en osciloscopios de altas prestaciones. Sin embargo, el proyecto pronto se reorientó hacia la construcción de un instrumento que utilizase los ligeros y manipulables electrones para “iluminar” una muestra y de esta forma lograr una amplificación de la imagen. Ruska y Knoll construyeron en 1931 un equipo con el que obtuvieron las primeras imágenes ampliadas de unas rejillas. En la Fig. 6 se muestra una imagen de ambos científicos junto a este instrumento. Dicho equipo, que todavía no alcanzaba la resolución de un MO, es considerado el primer microscopio electrónico.



Fig. 6

Ruska y Knoll trabajando en el primer microscopio electrónico. Imagen publicada en (Ruska, 1979) y reproducida con permiso de Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina - Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Sajonia-Anhalt, Alemania).

Por su parte, Reinhold Rüdenberg (1883-1961), que trabajaba como ingeniero en Siemens-Schuckert, planteó la construcción de un microscopio basado en lentes electrostáticas, invención que registró en 1932 en la Oficina de Patentes de Estados Unidos. Sin embargo, parece que nunca llegó a construir un instrumento operativo. Un año después, Ruska y Knoll, construyen su segundo microscopio electrónico, con tres lentes magnéticas, más complejo que el primero, con el que superaron el poder de resolución de los MO.

El mundo académico entró en una fase de agitación. En Bruselas, el físico húngaro Ladislaus Laszlo Marton (1901-1979) construyó en 1932 un microscopio electrónico con el que dos años después obtuvo la primera micrografía de un tejido vegetal. En 1934, el alemán Walter Kohl, mientras realizaba una estancia en la Universidad de Toronto (Canadá), diseñó un prototipo de microscopio electrónico. Un año después en la misma Universidad, Cecil Hall, construyó otro equipo con una lente electrostática, siendo el antecedente del equipo desarrollado en 1939 por el equipo de Eli Franklin Burton (1879-1948) en la misma institución. En 1935, Paul Anderson y Kenneth Fitzsimmons en la Washington State University (EE.UU.) diseñan otro prototipo de microscopio electrónico, aunque en 1938 su proyecto finaliza por falta de financiación. En 1935, el propio Knoll (que se había integrado en la empresa Telefunken manteniendo un cargo académico en la Escuela Técnica de Berlín) propuso el diseño de un equipo

que permitía hacer barridos con el haz de electrones sobre la muestra anticipándose a la construcción, en 1937, de un microscopio de características similares por parte de Manfred von Ardenne (1907-1997) quien dirigía su propio laboratorio privado en Berlín. En esos años, Louis C. Martin del Imperial College de Londres diseñó el primer microscopio británico. A esta lista de personas podrían unirse los nombres de otros pioneros en Japón, Francia, Suecia o Italia. Los avances conseguidos entre 1933 y 1937 corresponden a un periodo de incubación de la técnica, que refleja la ebullición que los descubrimientos disruptivos producen en la comunidad científica (van Gorkom et al., 2018).

Como curiosidad mencionaremos que los primeros microscopios electrónicos fueron denominados hipermicroscopios, ultramicroscopios o supermicroscopios. Finalmente, se impuso el término “microscopio electrónico”, que engloba tanto los equipos basados en la transmisión de electrones a través de la muestra como los que se basan en el barrido de un haz electrónico sobre la misma. En este artículo se usará el acrónimo ME para referirse al microscopio electrónico, en general. Sin embargo, se usarán los acrónimos TEM (del inglés *Transmission Electron Microscope*) y SEM (del inglés *Scanning Electron Microscope*) para referirse a los microscopios electrónicos de transmisión y de barrido, respectivamente, empleando la jerga empleada en los laboratorios.

Las poderosas industrias de equipamiento electrónico seguían muy de cerca todos los desarrollos que se hacían en diferentes universidades porque los ME representaban una gran oportunidad para sus negocios. En 1937, Siemens contrata a Ruska, a su hermano Helmut Ruska (1908-1973), médico de formación, y a Bodo von Borries (1905-1956), colaborador de Ruska desde el inicio del desarrollo del ME. El objetivo de este grupo era potenciar el uso de esta técnica en biología y medicina. De esta forma, Siemens lanzó en 1939 el primer TEM comercial del mundo, con un asombroso poder de resolución de 10 nm y unos 14 000 aumentos (14 000X). En 1940, la empresa norteamericana Radio Corporation of America (RCA) comercializa un ME gracias al trabajo de los ingenieros J. Miller y V. K. Zworykin (1888-1982). Se debe desatacar que Zworykin estuvo detrás de muchas invenciones que permitieron desarrollar la televisión. Ese mismo año, las empresas Philips (Países Bajos) y Metropolitan Vickers (Reino Unido) presentaron sus modelos de ME comerciales. A lo largo de la década de los 1940 la empresa alemana AEG y la japonesa JEOL lanzaron sus propios equipos. En 1951, la empresa Tesla, fundada en la ciudad de Brno, en la antigua Checoslovaquia, presentó un equipo que pronto se convirtió en un referente en los países del bloque soviético.

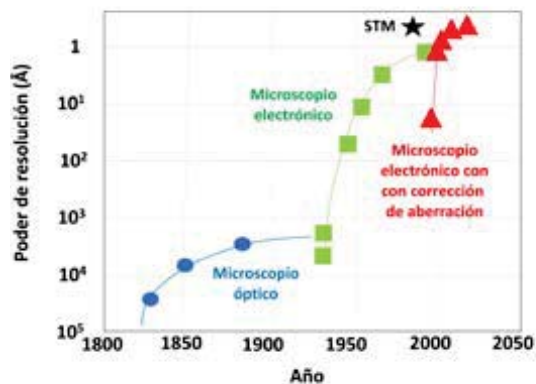


Fig. 7

Evolución de la resolución de los microscopios ópticos (círculos), electrónicos (cuadrados), y electrónicos con corrección de aberración (triángulos). La estrella representa la microscopía de efecto túnel (STM). Basada en (Liu, 2021).

Durante las décadas de los años 40 y 50 del siglo XX tuvo lugar una carrera frenética para desarrollar y comercializar ME, incorporando ideas y desarrollos procedentes del mundo académico y del industrial, proporcionando a los equipos continuas mejoras lo que les permitía incrementar su poder de resolución y su capacidad de análisis. En la Fig. 6 se muestra la evolución del poder de resolución para diferentes técnicas microscópicas, siendo destacable el salto observado en los años 1940. En 1946, James Hillier (1915-2007) consiguió la asombrosa resolución de 1 nm, lo que llevó a pensar que conseguir la resolución atómica estaba al alcance de la mano.

¿Cómo funciona un microscopio electrónico?

Un ME posee una serie de elementos estructurales básicos, aunque dado que existen varias familias de equipos, estos presentan variaciones en sus arquitecturas y funcionamiento (Thermofisher, 2020). En este apartado nos vamos a centrar en los ME más comunes, los TEM y los SEM, ya mencionados anteriormente. Los esquemas de ambos instrumentos se muestran en las Figuras 8 y 9, respectivamente.

La torre o columna de un ME consiste en una robusta cámara de acero en la que se ubican los restantes componentes del equipo. En la columna se practica un vacío, generalmente de alta intensidad, con la ayuda de bombas usualmente montadas en cascada (difusión, turbomolecular). Los electrones son emitidos por un filamento que puede tener distintas formas y composiciones (tungsteno, hexaboruro de lantano -LaB6- o cerio), y son acelerados mediante un voltaje aplicado entre el ánodo y el cátodo, que puede oscilar entre unos pocos kV hasta unos 200 kV (aunque en algunos equipos se pueden aplicar más de 1 MV). La pequeña masa de los electrones favorece que estos adquieran grandes velocidades al ser acelerados, que pueden llegar a ser una fracción relevante de la velocidad de la luz, por lo que se deben tener en cuenta los denominados efectos relativistas. Estas elevadas velocidades dan lugar a longitudes de onda de los electrones sumamente pequeñas (como

consecuencia del principio de De Broglie) lo que proporcionaría un excepcional poder de resolución teórico según el criterio de Abbe (ver la Fig. 3).

El haz de electrones generado es modificado por la acción de diversas lentes, que pueden ser electrostáticas o magnéticas, siendo estas últimas las que más se han extendido. La primera lente (lente condensadora) enfoca el haz de electrones sobre la muestra de forma análoga a la lente del mismo nombre en un microscopio óptico. La muestra, en el caso del TEM, está ubicada en una estructura circular con un diámetro estandarizado de 3,05 mm que tiene forma de rejilla y está constituida por materiales diversos (carbono, cobre, níquel, oro, plástico...) según la aplicación o el tipo de muestra a observar. En el caso del SEM, la muestra se sitúa sobre un soporte de mayor tamaño. En un ME la muestra se sitúa en un portamuestras que permite visualizar diferentes regiones de la muestra con distintas orientaciones respecto del haz incidente de electrones. En equipos más sofisticados, la muestra puede enfriarse, calentarse, deformarse, someterse a campos eléctricos o magnéticos, estar rodeada localmente de pequeñas concentraciones de distintos tipos de gases, etc.

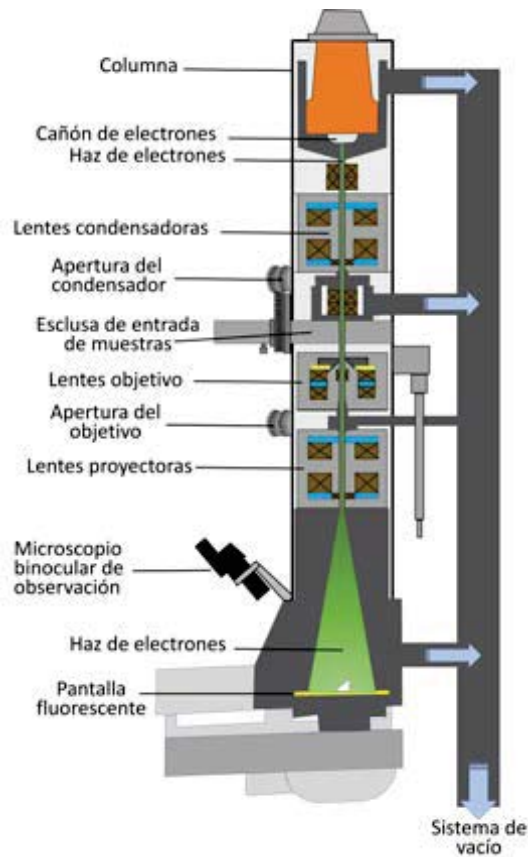


Fig. 8

Esquema de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) modelo EM10C (Zeiss). Cortesía del Dr. Juan de Dios Alché Ramírez.

En un TEM, el haz de electrones tras atravesar la muestra es modificado por otro grupo de lentes (lentes proyectoras) que amplifican el haz transmitido sobre una pantalla fluorescente, una placa fotográfica u otro tipo de detectores (centelleadores, CCDs o CMOS) que generan y/o registran la imagen aumentada de la muestra.

En un SEM también encontramos un sistema de generación de vacío, un emisor de electrones, y lentes condensadoras. Sin embargo, en este caso, los electrones se focalizan mucho, aunque empleando un menor voltaje acelerador. El sistema de lentes consigue que el haz incida sobre una zona de tamaño muy pequeño (del orden de 1 nm).

En esta región se produce una compleja interacción de los electrones con la muestra (Egerton, 2005) provocando que algunos electrones se pierdan en su interior mientras que otros son reflejados en diferentes direcciones. El haz incidente también es capaz de arrancar electrones de los átomos ubicados en la zona más superficial de la muestra. Estos electrones, denominados “secundarios”, poseen

menos energía que los del haz principal incidente y si logran escapar de la muestra son recogidos por un sofisticado sistema de detección. La intensidad de la señal proporcionada por los electrones secundarios para cada punto muestreado está relacionada con la topografía y la constitución de la muestra. De esta forma, realizando un rastreo de la muestra mediante barridos del haz electrónico es posible reconstruir su topografía tridimensional (3D).

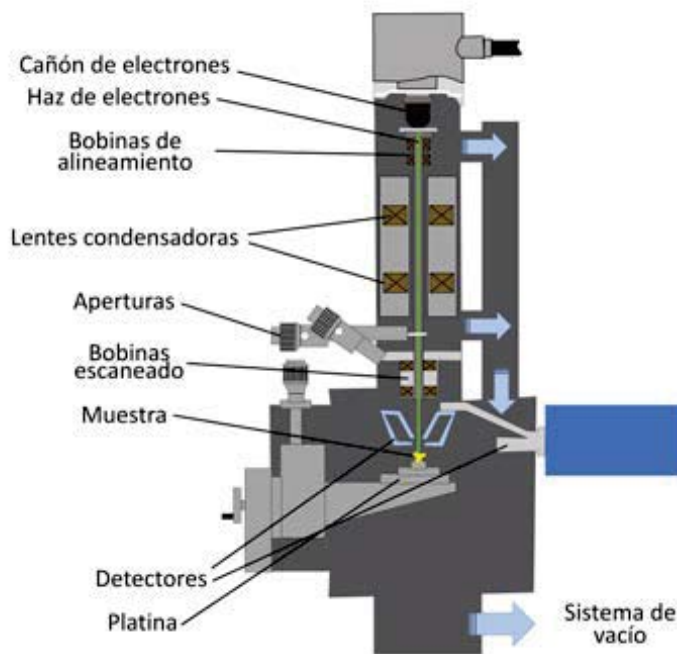


Fig. 9

Esquema de un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo DSM 950 (Zeiss).
Cortesía del Dr. Juan de Dios Alché Ramírez.

Al utilizar un ME se desea obtener una imagen de alta resolución, por lo que todo el sistema debe estar muy controlado, eliminando vibraciones mecánicas, minimizando fluctuaciones del haz electrónico, así como de los campos generados por las lentes electrostáticas o magnéticas, etc. En realidad, el poder de resolución de estos microscopios no está condicionado por la longitud de onda de los electrones, sino por las aberraciones de las lentes electrostáticas y magnéticas, así como por las vibraciones y fluctuaciones que se acaban de mencionar. Las lentes electromagnéticas están formadas por electrodos y bobinas que provocan ciertas distorsiones en el haz, que se traducen en aberraciones que deben ser corregidas con sofisticadas técnicas, al igual que ocurre con las lentes ópticas. La analogía entre la óptica convencional y la ciencia que estudia el movimiento de electrones en presencia de campos electrostáticos y magnéticos es tan grande que en las primeras décadas del siglo XX se acuñó el término “óptica electrónica” para referirse a esta rama de la física.

La preparación de las muestras para su observación en los ME es uno de los pasos más críticos, limitando en la mayoría de los casos la resolución y la capacidad analítica de estos instrumentos. En el caso de los TEM, este es un asunto de cierta complejidad, ya que los electrones no pueden atravesar espesores superiores a unos pocos cientos de nanómetros. La preparación de las muestras para su observación requiere la utilización de técnicas de ultramicrotomía

(que consiguen cortes transversales de la muestra con espesores minúsculos) o de adelgazamiento (mediante desgaste, pulido, bombardeo con iones, etc.). Por otro lado, la muestra no puede contener agua ni emitir (desorber) gases que contaminen el interior de la columna. Además, como ocurre con el MO, es posible realizar tratamientos de la muestra con ciertos elementos químicos para lograr mejorar el contraste de zonas concretas de interés. Se trata, en general, de sales y elementos de alta densidad electrónica y metales pesados (uranio, plomo, lantano...). En algunos casos también es posible obtener una réplica de una muestra (mediante su recubrimiento metálico), logrando reproducir su topografía, siendo esta réplica la que luego es estudiada en el TEM.

En el caso del SEM también es necesaria, en muchos casos, la preparación previa de las muestras mediante su deshidratación y/o la metalización de su superficie, de forma que la topografía observada es en realidad la correspondiente a la delgada capa que recubre al espécimen. Los elementos más comunes para realizar el recubrimiento son oro, platino y carbono. Este recubrimiento además incrementa la conductividad de la muestra, evitando los riesgos debidos a la acumulación de carga o a la escasa disipación térmica, fenómenos que generan alteraciones en las imágenes de la muestra.

El uso de los ME requiere una gran cualificación siendo necesario comprender su funcionamiento, aplicar las adecuadas técnicas para preparar distintos tipos de muestras, e ir desarrollando pericia (el famoso “ojo

de microscopista”) para interpretar las fascinantes imágenes obtenidas y así poder explotar al máximo su potencial.

El auge de la microscopía electrónica

Desde su invención, los ME tuvieron un desarrollo muy rápido debido a sus prometedoras características (Reyes Gasga, 2020; Mestres Ventura, 2023). Tras el sólido establecimiento de las empresas Siemens y RCA a principios de la década de 1940 ambas compañías tuvieron que adecuarse a los convulsos tiempos de la Segunda Guerra Mundial. Mientras que RCA pudo desarrollar sus microscopios sin grandes contratiempos, Siemens lo hacía mientras sus instalaciones sufrían graves bombardeos. Esto permitió a RCA recuperar parte de la ventaja que Siemens tenía inicialmente. En estos años también surgieron otras empresas dedicadas a la fabricación de ME como Metropolitan Vickers en el Reino Unido, Tesla en Checoslovaquia o JEOL en Japón, ya mencionadas en el apartado anterior. Esto demuestra el enorme interés que estos equipos suscitaban por su espectacular poder de resolución y la enorme capacidad de aumento de las imágenes. En colaboración con centros de investigación locales o realizando desarrollos propios, estas empresas comenzaron a mejorar los diseños de los

equipos e incorporar instrumentos adicionales de caracterización de las muestras que operaban en el propio microscopio. En paralelo, se desarrollaron nuevos métodos de preparación de muestras para que la técnica se fuera extendiendo a diferentes áreas de investigación.

Hay que mencionar que el acceso a estos equipos era costoso, tanto por el precio de los mismos, como por la necesidad de disponer de unas instalaciones adecuadas, realizar su mantenimiento y por tener que contar con un personal altamente cualificado tanto en su manejo como en la preparación de las muestras. Sin embargo, el mercado potencial para los ME era enorme, por lo que cientos de universidades, centros de investigación y empresas comenzaron a adquirir estos instrumentos para aumentar sus capacidades y mejorar su competitividad.

Si atendemos al periodo de tiempo cubierto por la exposición (de los años 40 a los 80 del siglo pasado), entre las mejoras que se fueron añadiendo a los ME, podemos destacar (Haguenau et al., 2003): i) el

paulatino aumento del potencial de aceleración con el fin de disminuir la longitud de onda de los electrones y así conseguir un mayor poder de resolución; ii) el aumento del número de las lentes electromagnéticas; iii) el diseño más eficiente de estas lentes para evitar aberraciones o fluctuaciones descontroladas de los campos; iv) la mejora de la estabilidad del haz electrónico debida al perfeccionamiento de las fuentes de alimentación y la electrónica de control; y v) el uso de los denominados modos de campo claro y oscuro para mejorar el contraste de la muestra.

Otros desarrollos que se fueron añadiendo paulatinamente en los ME incluyen la catodoluminiscencia (CL), basada en la emisión de una luz característica por algunos materiales cuando sobre ellos incide un haz de electrones, lo que permitía en algunos casos determinar la composición del material. En 1943 se incorpora la espectroscopía de pérdida de energía (EELS), técnica que proporciona información sobre la muestra a partir de la forma en la que los electrones del haz incidente van decelerándose en el interior de la muestra. También se incorporan sistemas capaces de estudiar la difracción de electrones (ED), que permite obtener información sobre estructuras periódicas a partir del patrón de interferencia de los electrones transmitidos en diferentes direcciones tras atravesar la muestra, lo que permite inferir la estructura ordenada o desordenada de la muestra y, en el primer caso, las dimensiones de la celda unidad que se repite para formar la estructura periódica.

Otra técnica de análisis que se incorporó a los ME fue la espectroscopía de rayos X (EDX). Cuando los electrones de alta energía del haz principal inciden sobre la muestra provocan la extracción de electrones de las capas energéticas más profundas de algunos átomos. El hueco creado es ocupado por otro electrón del mismo átomo y durante esta transición se libera energía en forma de una onda electromagnética de gran energía (rayos X). El análisis de estos rayos X permite conocer la composición de la materia.

Un hito relevante en el desarrollo de los TEM fue la introducción, en 1951, del LaB6 como material para la emisión de electrones, consiguiendo una mejora considerable en la densidad de corriente emitida. En cuanto a la mejora en los sistemas de detección, en 1960 se inventó el detector de tipo centellador.

Ya se mencionó anteriormente que el SEM fue ideado casi a la vez que el TEM. Sin embargo, tanto la detección de los electrones secundarios como la interpretación de las señales recibidas y su conversión en topografías 3D presentaban dificultades que tardaron un tiempo en resolverse. Además, el control del fino haz que barría la muestra requería de una sofisticada electrónica de control. En 1965, la empresa Cambridge Scientific Instruments presentó el SEM Stereoscan 1, primer equipo comercial de este tipo. Su capacidad de obtener imágenes 3D de la topografía de la muestra fue clave para impulsar esta técnica, que rápidamente se extendió por todo el

mundo, por lo que a partir de esos años fue habitual que un servicio de microscopía electrónica contase tanto con un TEM como con un SEM. En 1980, el SEM comercial alcanzó los 2 nm de resolución.

La evolución de los ME hasta el año 1979 queda magníficamente representada en la Fig. 10 que muestra un cartel publicitario de la empresa JEOL. Sin embargo, en la década de los años 80, se produce un cambio trascendental en estos equipos. Con la llegada de la electrónica basada en semiconductores, los circuitos integrados fueron sustituyendo a las válvulas de vacío que se usaban en los ME. En 1986 hacen su aparición los primeros ME controlados por computadores, lo que supuso una nueva forma de trabajar con estos equipos. En esa época comienzan a desaparecer las consolas repletas de botones, palancas e indicadores, que fueron sustituidas por consolas virtuales que aparecían en el monitor de una computadora con la que se interaccionaba primero con un teclado y más adelante con un ratón.

Hasta ahora se ha descrito la evolución de los elementos que se encuentran en un ME, pero en paralelo a esta evolución, el uso de estos equipos se fue extendiendo a diferentes disciplinas. Inicialmente, la medicina parecía ser el ámbito en el que la microscopía electrónica podría representar un salto cualitativo en la caracterización de tejidos. La histología o la anatomía patológica habían alcanzado un desarrollo considerable con el uso del MO, pero la llegada del ME supuso un salto cuantitativo en

estas disciplinas. Ya se mencionó anteriormente que H. Ruska, hermano de E. Ruska, con formación en biología y medicina, apostó decididamente por el desarrollo del ME porque pensaba que la medicina sería un fértil territorio para esta técnica, por lo que recorrió universidades y empresas en Alemania promocionando esta técnica. El propio H. Ruska hizo notables observaciones de virus y otras entidades biológicas usando los primeros ME. Con estos equipos era posible relacionar la estructura a nivel nanométrico o molecular con la funcionalidad de los componentes de las células, bacterias o virus, conocer la manera en la que algunas enfermedades aparecen y se desarrollan, estudiar la acción de los fármacos, etc. Entre los ejemplos más llamativos de las aportaciones de la microscopía electrónica a la medicina están, sin duda alguna, las observaciones de la sinapsis neuronal realizadas entre 1953 y 1955 por varios grupos de investigación, confirmando la teoría neuronal de Ramón y Cajal. Con el tiempo, las aplicaciones en medicina como herramienta de diagnóstico fueron perdiendo importancia debido a la dificultad en la preparación de muestras y la aparición de otras técnicas de diagnóstico más eficaces. Sin embargo, su uso para caracterizar las ultraestructuras celulares y comprender la funcionalidad de estas se ha mantenido hasta nuestros días.

En cuanto a la incidencia de la microscopía electrónica en campos como la física o la química se debe mencionar que fue escasa antes de la Segunda

Guerra Mundial, dada la prioridad que se daba en estas disciplinas a temas como la radiactividad, la estructura de la materia, la mecánica cuántica, la física nuclear, las radiaciones cósmicas, etc. Sin embargo, acabada la contienda bélica, tuvo lugar primero el gran desarrollo de la ciencia de materiales seguido del de la electrónica de estado sólido. En ambos campos la microscopía electrónica

se convirtió en una técnica indispensable de caracterización. A medida que se perfeccionaron las técnicas de síntesis y caracterización, se comenzó a entender y controlar la constitución de la materia a escala nanométrica, allanando el terreno para la llegada de la disciplina que ahora conocemos como nanotecnología y de la que hablaremos también en el siguiente apartado.



Fig. 10

Cartel publicado por la empresa JEOL en 1979, con motivo del 30º aniversario de la fundación de dicha empresa, que muestra los principales equipos comercializados por diferentes compañías hasta esa fecha. Cortesía de JEOL.

Para terminar este apartado se debe mencionar que a medida que la microscopía electrónica se expandió, fueron constituyéndose comunidades de desarrolladores y usuarios que se organizaron en sociedades nacionales e internacionales de microscopía, celebrando reuniones y congresos científicos en los que se intercambiaban ideas y

metodologías. Hay que mencionar que en ocasiones estos intercambios estaban limitados por la confidencialidad que guardaban las empresas del sector. En cualquier caso, estas asociaciones fueron clave para generar una comunidad científica que ha tenido un papel clave en el desarrollo científico desde mediados del siglo XX.

El microscopio de efecto túnel

Desde la década de 1960 se comenzó a profundizar en el estudio de las ricas propiedades cuánticas del transporte electrónico gracias a la capacidad de construir dispositivos mediante técnicas de gran precisión que también se estaban utilizando en la emergente industria de la microelectrónica. Uno de los temas de interés era conocer las propiedades de la transmisión de electrones a través de pequeñas constricciones, pues aparecen interesantes efectos cuánticos debido al confinamiento que sufren los electrones. Otro tema al que se prestaba atención era el estudio de la transmisión de electrones a través de barreras de energía mediante el sorprendente efecto túnel del que ya hemos hablado. Para lograr observar este efecto, se construían dispositivos de geometría fija en los que dos superficies conductoras se mantenían a distancias de unas pocas décimas de nanómetro, separadas entre sí por un material

aislante o vacío. Esta separación generaba una barrera de potencial que no podía ser superada por un electrón en los términos previstos de la mecánica clásica pero sí en los de la mecánica cuántica, con una cierta probabilidad de transmisión que dependía de factores como la separación entre los electrodos y la altura de la barrera.

A principios de los años 1980, los investigadores Heinrich Rohrer (1933-2013) y Gerd Binnig (1947-) del laboratorio de la empresa IBM ubicado en la localidad de Rüschlikon, cerca de Zürich (Suiza), diseñaron un sofisticado equipo de geometría variable con el que intentaban medir la corriente túnel que aparece entre dos electrodos, siendo uno de ellos una afiladísima punta metálica que podía moverse sobre el otro, una superficie de un material conductor. En este instrumento, la punta se acercaba a la superficie de una forma controlada sin llegar a

contactar con la misma, mientras una diferencia de potencial electrostático se aplicaba entre ambas. De esta forma, para separaciones de unas pocas décimas de nanómetro, se observaba la aparición de la denominada “corriente túnel”, un tenue flujo de electrones que pasaban de un electrodo al otro mediante el efecto túnel.

Estos instrumentos eran capaces de acercar la punta a la muestra de una forma estable mediante sistemas mecánicos fabricados con materiales piezoeléctricos (deformables cuando se someten a diferencias de potencial). Para lograr esta estabilidad tenían que estar aislados de todo tipo de vibraciones mecánicas, lo que se conseguía con un complejo sistema amortiguador diseñado con imanes y muelles. Otro factor clave era el uso de vacío para evitar que se situasen átomos o moléculas entre la punta y la muestra que alterasen completamente las medidas realizadas. Finalmente el funcionamiento del sistema requería un equipo electrónico muy sensible, capaz de detectar minúsculas corrientes.

En un momento dado se concibió la posibilidad de usar este instrumento para medir la corriente túnel en diferentes puntos de una muestra mientras la punta barría su superficie, haciendo uso de sistemas de posicionamiento también basados en los materiales piezoeléctricos anteriormente mencionados. De esta forma, la corriente túnel medida en cada punto podría servir para adquirir información de la

topografía de la superficie ya que dicha corriente es muy sensible, entre otros factores, a la separación entre la punta y la muestra. De esta forma, en 1981 se construyó un aparato, que actualmente conocemos como Microscopio de Efecto Túnel, habitualmente denominado STM por las siglas de la denominación en inglés *Scanning Tunneling Microscope* (Binnig y Rohrer, 1987). La Fig. 11 muestra el esquema de un STM y la formación de la imagen topográfica de una muestra mediante barridos sucesivos.

Con este equipo se comenzaron a obtener imágenes de superficies de muestras conductoras con una gran resolución, ya que era posible identificar con claridad las posiciones de los átomos. Esta técnica supuso una pequeña revolución en el mundo de la microscopía porque abandonaba el uso de haces electrónicos de alta energía, propio de los TEM o SEM, y en su lugar usaba corrientes electrónicas mucho más pequeñas. De alguna forma se puede pensar que el complejo sistema que se encuentra en la columna de un ME formado por un emisor, los electrodos de aceleración y varias lentes electrostáticas o magnéticas, fue sustituido por una punta que es capaz de acercar la emisión de electrones muy cerca de la superficie de la muestra, operando a voltajes mucho más bajos. Se dice que el STM es un sistema de “campo cercano”.

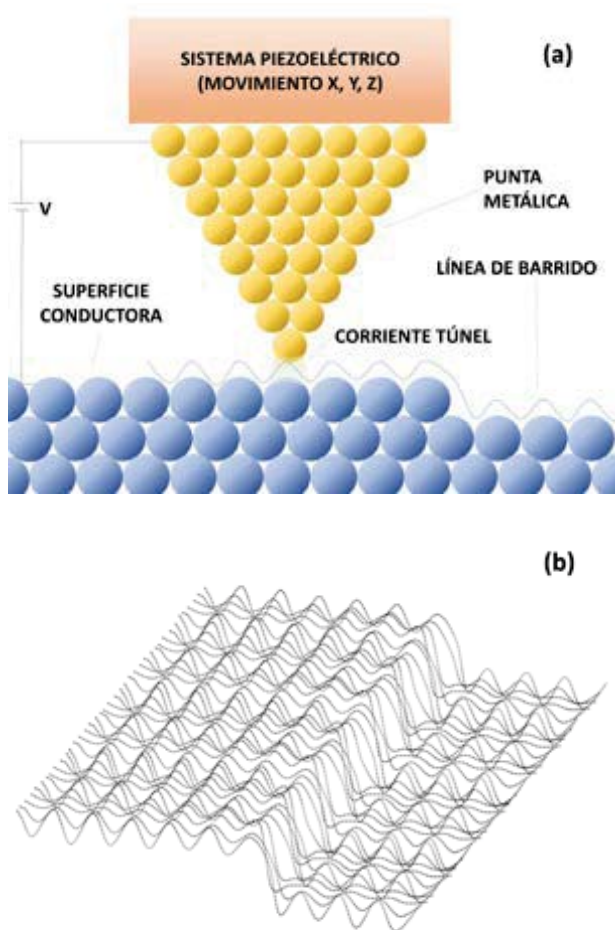


Fig. 11

(a) Esquema de un microscopio de efecto túnel (STM) con sus principales elementos. (b) Ejemplo de reconstrucción de una superficie a partir de las líneas de barrido. Cortesía del Dr. Pedro Amalio Serena Domingo.

La hazaña de conseguir imágenes con resolución atómica de una manera relativamente simple y reproducible fue rápidamente reconocida con la concesión del Premio Nobel de Física de 1986 a Rohrer y Binnig, compartido con Ruska por su invención del ME. Por cierto, mientras que Rohrer y Binnig consiguieron este galardón en menos de cinco años desde su invención, Ruska tuvo que esperar más de medio siglo. En ocasiones se debe esperar toda una vida para recibir un premio de esta categoría, o no llega nunca, como ocurrió en el caso de Knoll, coinventor del ME.

Desde su invención, el STM evolucionó rápidamente porque sus inventores compartieron los secretos de la técnica con numerosos grupos de investigación de todo el mundo (Asenjo et al., 2022). De esta manera el instrumento fue incorporando numerosas mejoras: mayor estabilidad de la corriente, sensores más efectivos, diseños más compactos que evitaban los ruidos mecánicos, sistemas más precisos de control de la posición relativa entre la punta y la muestra, fabricación de puntas cada vez más afiladas, software para la adquisición y análisis de imágenes, control de algunas variables como temperatura, campos magnéticos, entorno químico de la muestra, etc. De forma paralela, numerosas empresas comenzaron a comercializar equipos STM. La comunidad dedicada al diseño y uso de estos equipos creció rápidamente.

Uno de los logros más destacables del STM fue el conseguido en 1990 por Donald M. Eigler (1953-) y Erhard K. Schweizer, investigadores del centro Almaden Research Center de IBM (EE.UU.), cuando escribieron el logotipo de su empresa con 35 átomos de xenón usando la punta de un STM como una “nanopinza” con la que ver y mover átomos (Eigler y Schweizer, 1990). Este tipo de estudios abrieron nuevos campos de investigación gracias a la posibilidad de manipular individualmente átomos. La Fig. 12 muestra un ejemplo de imagen obtenida mediante manipulación de átomos usando un microscopio STM.

El desarrollo de herramientas con la capacidad de ver y mover átomos de manera individual ya había sido anticipado en el año 1959 por Richard Feynman (1918-1988), quien expuso en su famosa conferencia “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” (“En el fondo hay mucho sitio”), que estas capacidades, junto con otros avances en la síntesis y caracterización de materiales, desencadenarían una revolución en la forma de fabricar materiales y dispositivos (Feynman, 1960). Esta revolución, que ya ha sido mencionada, ha dado lugar a la disciplina que llamamos nanotecnología (Serena, 2021) que, en parte, ha sido posible gracias a la contribución realizada por las diferentes técnicas microscópicas desarrolladas en el siglo XX (Rivera y Arenas, 2020).

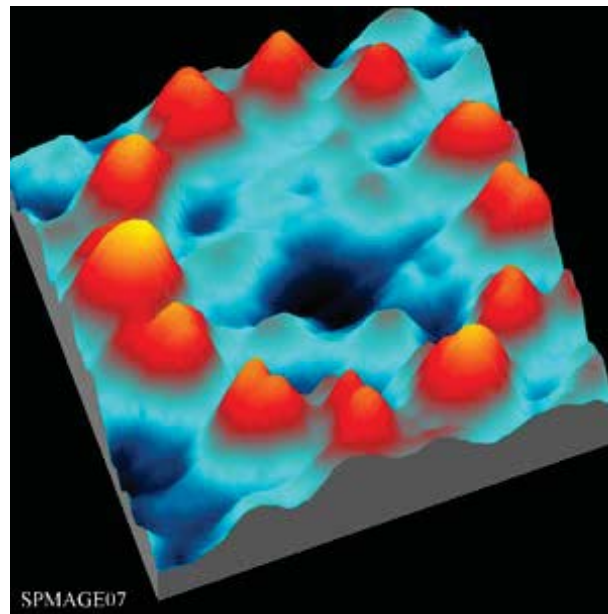


Fig. 12

Imagen de 5 nm x 5 nm obtenida mediante microscopía de efecto túnel (STM) donde se muestran 12 átomos de bromo colocados individualmente sobre una superficie de silicio (Si(111)-(7x7)). Autor: Seung Yun Yang, Universidad de Toronto (Canadá). Imagen finalista del certamen SPMAGE07.

Presente y futuro de la microscopía electrónica

Antes de profundizar en lo que ha ocurrido con la microscopía electrónica en épocas más recientes, se debe mencionar que la utilización de los MO lejos de disminuir ha seguido creciendo, gracias a los avances que estos instrumentos han experimentado incorporando potentísimas metodologías como el contraste de fase, la fluorescencia, la emisión de dos o más fotones, la super-resolución, etc. Los MO continúan siendo imprescindible en el ámbito biológico y médico, complementando otras muchas técnicas, con el fin de conseguir una caracterización completa de tejidos, células, proteínas, cromosomas, ADN, etc.

Como ya se ha señalado, la exposición realiza un recorrido por una parte de la historia de la microscopía electrónica mostrando instrumentos fabricados o instalados entre los años 40 y 80 del pasado siglo. En este periodo tuvo lugar la mejora considerable de los instrumentos, el desarrollo de las técnicas de caracterización asociadas y la optimización de los protocolos de preparación de muestras. Durante este tiempo algunas empresas líderes en la fabricación de ME abandonaron el mercado, como ocurrió sorprendentemente con Siemens o RCA, otras como Philips (luego FEI) o JEOL se consolidaron, y algunas nuevas entraron en escena, como Hitachi, ThermoFisher o TESCAN.

Estas dinámicas son habituales en sectores en los que la competitividad tecnológica es extrema.

Desde mediados de 1980, han transcurrido más de cuatro décadas que es un tiempo más que considerable para cualquier tecnología. Solo basta pensar en lo ocurrido con equipamientos que utilizamos de manera habitual como teléfonos, monitores de televisión o automóviles. La microscopía electrónica no ha sido una excepción, y aunque el fundamento y la estructura esencial del TEM y del SEM se han mantenido desde su invención, ambas técnicas han experimentado avances significativos con el fin de mejorar la resolución y calidad de las imágenes, ampliar el abanico de materiales y especímenes bajo estudio, y facilitar su operación (ThermoFisher, 2022).

Como ya se ha mencionado anteriormente, uno de los cambios más evidentes, iniciado a mediados de los años 1980, ha sido la incorporación de las tecnologías digitales en el control de la estabilidad de las lentes electromagnéticas, la automatización de la operación de los equipos, y la digitalización de la adquisición y el tratamiento de imágenes de las muestras. En el caso específico del SEM, la digitalización ha venido de la mano de la comercialización de equipos de sobremesa, compactos y de pequeñas dimensiones, haciendo accesible esta técnica a pequeños laboratorios y aulas de enseñanza. Por cierto, este

tipo de microscopio de sobremesa y fácil utilización se anticipó en la película de culto “*Blade Runner*” dirigida por Ridley Scott en 1982.

No hay que olvidar que las tecnologías digitales también permiten poner en común y combinar adecuadamente toda la información estructural y composicional adquirida por un ME con aquella procedente de otras técnicas microscópicas y analíticas, proporcionando una visión global del sistema estudiado. Las técnicas que permiten esta eficiente combinación de datos se denominan “correlativas”. Más recientemente los desarrollos en Inteligencia Artificial (IA) se están empezando a incorporar en microscopía electrónica, lo que permite analizar de forma más eficiente la enorme cantidad de datos que son adquiridos o explorar automáticamente regiones de interés de la muestra, por poner un par de ejemplos.

Otras mejoras que se han incorporado en los ME han sido fundamentales para mejorar la calidad de las imágenes y aumentar el poder de resolución. Se puede citar el desarrollo de nuevos detectores que son capaces de recoger electrones con un rango de energía bien definido o que han sido dispersados en una determinada dirección. Estos avances junto con un adecuado diseño de las lentes electromagnéticas y el tratamiento de imágenes con potentes programas informáticos han dado lugar a los TEM de alta resolución (HRTEM, del inglés *High Resolution TEM*). Con esta técnica se ha alcanzado una resolución de

50 pm (¡0,05 nm!) de forma que es posible conseguir nítidas imágenes de los átomos. Esta potente técnica permite, por ejemplo, realizar un estudio tomográfico de una partícula formada por decenas de miles de átomos, resolviendo la posición y la especie química de cada uno de sus átomos (Calderon, 2020).

En otros casos, las mejoras del TEM o del SEM se han conseguido gracias a sofisticadas modificaciones técnicas con las que cambiar las condiciones ambientales de la muestra, controlando su temperatura, aplicando campos magnéticos, o incluso inyectando pequeñas cantidades de gas en su entorno, como se ha mencionado anteriormente. De esta forma es posible conocer, por ejemplo, cómo se comporta un material en condiciones cercanas a su modo de operación. Estas modificaciones han dado lugar a los ME ambientales de tipo E-TEM o E-SEM, donde la E hace referencia al término inglés *environmental* (ambiental).

En otras ocasiones, no solo es posible cambiar las condiciones del material sino producir cambios en su estructura mediante el bombardeo local con iones que, gracias a su mayor masa, se convierten en auténticos cinceles capaces de tallar, cortar o perforar la muestra a escala nanométrica. Esta técnica se denomina FIB (del inglés, *Focussed Ion Beam*). En este caso, un mismo equipo incorpora sistemas capaces de generar y manipular haces de

electrones, por un lado, y de iones, por otro. De esta forma se puede observar la muestra mientras esta es modificada de manera controlada. Estos equipos con doble haz, se conocen como sistemas *DUAL Beam* y pueden ser del tipo TEM-FIB o SEM-FIB.

En el ámbito del STM es obligado mencionar que su forma de operar inspiró el desarrollo de una nueva familia de instrumentos, que de manera conjunta se denominan microscopios de sonda de barrido o SPM (del inglés *Scanning Probe Microscopy*) (Asenjo et al., 2022). Quizás el más conocido de ellos sea el Microscopio de Fuerzas Atómicas o AFM (del inglés *Atomic Force Microscope*). Con esta increíble técnica se miden las minúsculas fuerzas de distinto origen (magnéticas, electrostáticas, van der Waals,...) que se ejercen sobre una punta colocada en el extremo de una palanquita cuando dicha punta rastrea la superficie de una muestra. Midiendo en cada punto de la superficie estas fuerzas se consigue reconstruir un mapa topográfico de la superficie, que puede alcanzar resolución atómica. Estas herramientas han llegado a realizar la observación de las difusas nubes electrónicas asociadas a los orbitales atómicos y moleculares. Estas técnicas permiten operar en diferentes rangos de temperatura a la vez que la muestra puede estar sometida a campos magnéticos o electrostáticos, deformaciones, etc.

Quizá una de las ventajas de las técnicas SPM es la capacidad de trabajar en entornos líquidos permitiendo observar material biológico vivo, mientras realiza

sus funciones o deja de hacerlas debido a alguna enfermedad. Esto ha hecho que los equipos SPM cada vez sean más habituales en laboratorios dedicados a biomedicina o biotecnología. Un ejemplo de su aplicación en el campo de la biomedicina se muestra en la Fig. 13, en la que se observa un glóbulo rojo infectado por malaria. Esta imagen en la que un glóbulo rojo se representa con tonos dorados, permite ilustrar el hecho de que tanto en el ME, el STM o en las técnicas SPM, los datos registrados (intensidad de electrones, corrientes eléctricas, fuerzas) se usan para formar una imagen con una paleta de colores elegida al gusto del investigador o investigadora con el fin de resaltar aquellos detalles que se desea poner de relieve.

Para finalizar el repaso de los recientes avances de la microscopía electrónica a lo largo de las últimas cuatro décadas, es obligado mencionar la técnica de crio-microscopía electrónica de transmisión, usualmente abreviada con el acrónimo inglés CryoTEM. En esta aproximación, la muestra que se desea estudiar se mantiene a bajas temperaturas con el fin de disminuir las fluctuaciones del movimiento de los átomos, mejorando considerablemente la nitidez y la resolución de las imágenes. Para realizar las observaciones se utilizan detectores de gran eficiencia (de tipo CMOS) y además se requiere aplicar un potente tratamiento estadístico sobre las observaciones realizadas a numerosas muestras individuales para poder reconstruir una imagen 3D representativa de dicha muestra.

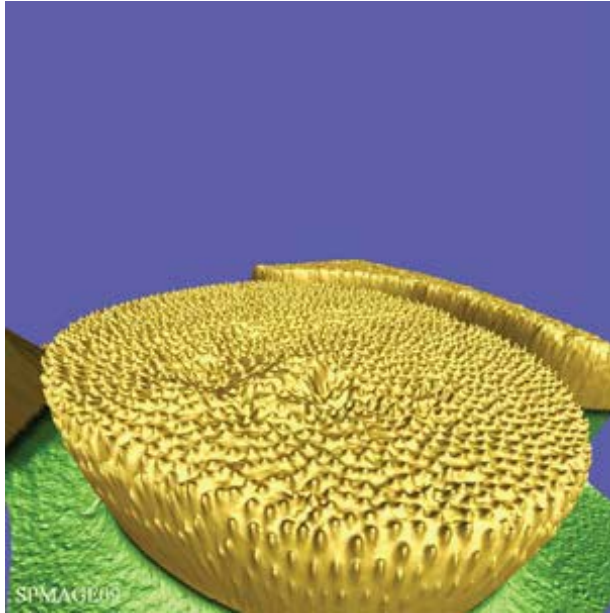


Fig. 13

Imagen obtenida mediante
microscopía de fuerzas
atómicas (AFM) de un glóbulo
rojo infectado por malaria.
Autor: Li Ang, Universidad
Nacional de Singapur.
Imagen finalista del certamen
SPMAGE09.

Mediante esta técnica se han obtenido imágenes de subestructuras celulares, cadenas de ADN, proteínas o virus con resolución atómica, lo que permite profundizar en la comprensión del funcionamiento de estas entidades biológicas (Castón, 2020). En la Fig. 14 se muestran imágenes de numerosos virus de la fiebre hemorrágica del conejo (RHDV) obtenidas con esta técnica, así como de la reconstrucción que se obtiene a partir de todas las observaciones realizadas. Todos recordamos las espectaculares imágenes del virus SARS-Covid19, que han servido para conocer su funcionamiento facilitando el diseño de las vacunas que tantas vidas han salvado. El desarrollo de la técnica CryoTEM ha sido de gran importancia para la ciencia actual, por lo que sus inventores, Jacques Dubochet (1943-), Joachim Frank (1940-) y Richard Henderson (1945-), fueron galardonados en 2017 con el premio Nobel de Química.

Queda patente que los últimos cuarenta años de desarrollo de las microscopías han dado mucho de sí, pero si de algo debemos estar seguros es de la continua progresión que estas técnicas seguirán experimentado en los próximos años, causándonos asombro con la consecución de espectaculares hitos, muchos de los cuales somos incapaces de imaginarnos en estos momentos. Asombro e incertidumbre son parte de la aventura que supone hacer ciencia.

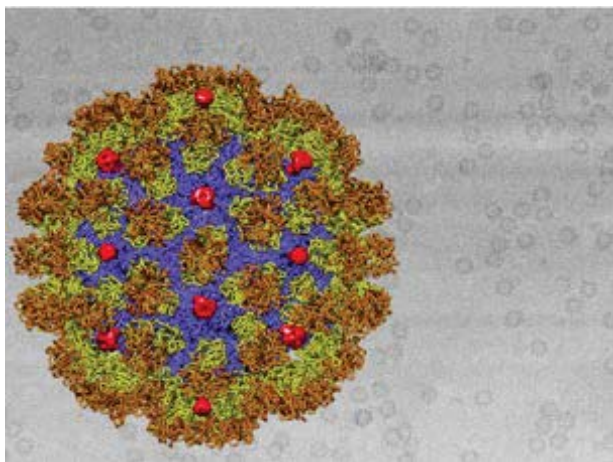


Fig. 14

Partículas vacías del virus de la fiebre hemorrágica del conejo (RHDV) observadas mediante crió-microscopía electrónica. Estas partículas han sido utilizadas para desarrollar vacunas de nueva generación. La imagen de la izquierda muestra la reconstrucción tridimensional calculada a partir de estas imágenes. Cortesía de José Ruiz-Castón (Centro Nacional de Biotecnología, CNB-CSIC).

Conclusiones

La historia que hemos relatado en el ámbito de la microscopía electrónica es pareja a la de los avances ocurridos en el desarrollo de instrumental en otros campos de la ciencia como el desarrollo de las técnicas espectroscópicas, la difracción de rayos X (ya sea en difractómetros convencionales o en gigantescos sincrotrones), los equipos de Resonancia Magnética Nuclear (RMN), los poderosos secuenciadores de ADN, los espectrómetros de masas, los analizadores de proteínas y metabolitos, los aceleradores de partículas, los gigantescos telescopios o los sistemas de simulación basados en supercomputadores, entre otros. Todos estos avances sirven y servirán para ampliar el conocimiento científico, la herramienta que proporciona la capacidad para entender nuestro mundo.

Esperamos que las pinceladas proporcionadas en este artículo, al igual que la exposición sobre uno de los desarrollos científico-tecnológicos más importantes del último siglo hayan sido del gusto del lector o lectora. Seguramente ambos hayan sabido a poco, lo que sería una buena señal, pues seguramente alimentará el deseo de seguir la exploración por su cuenta, aprovechando la enorme cantidad de información que hay disponible en bibliografía (por ejemplo (Alché et al., 2024)) y en otros formatos y canales.

Referencias

- Alché Ramírez, J. D., Asenjo Barahona, A., García Martín, J. M. y Serena, P. A. (2024). *Las nuevas microscopías. Herramientas para la exploración del nanomundo*. Real Sociedad Española de Física – Fundación Ramón Areces – Libros de La Catarata.
- Alché Ramírez, J. D. y Serena, P. A. (2025). Ocho décadas de microscopía electrónica en España. Artículo curatorial en este mismo catálogo.
- Asenjo, A., García-Martín, J. M. y Serena P. A. (2022). 40 años viendo átomos. *Revista Española de Física*, 36(3), 5-11.
- Barbero, S. (2025). Viendo más allá de la luz: los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica (1941-1964). Artículo curatorial en este mismo catálogo.
- Binnig, G. y Rohrer, H. (1987). Scanning tunneling microscopy--from birth to adolescence. *Review of Modern Physics*, 59 (3), 615-625.
- Calderón, H. A. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. *Mundo Nano*, 13(25), 133-156.
- Cánovas Sánchez, F. (2021). *Santiago Ramón y Cajal. Maestro, científico y humanista*. Alianza editorial.
- Castón, J. R. (2020). La Crió-Microscopía Electrónica para el estudio de virus y aplicaciones biotecnológicas. Sección “Acércate a” de la Sociedad Española de Biología y Biología Molecular. <https://sebbm.es/acercate-a/la-crio-microscopia-electronica-para-el-estudio-de-virus-y-aplicaciones-biotecnologicas/>
- Challoner, J. (2019). *El átomo: Componente fundamental de todas las cosas*. AKAL.
- De Felipe, J. (2005). Cajal y sus dibujos: ciencia y arte. En A. Martín Araguz (Coor.-Ed.), *Arte y Neurología* (pp. 213-230). Saned.
- Egerton, R. F. (2005). Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Springer.
- Eigler, D. M. y Schweizer, E. K. (1990). Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 344, 524-526.
- Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 23 (5), 22-36.
- Haguenau, F., Hawsked, P.W., Hutchinson, J. L., Satiat-Jeunemaître, B., Timon, G. T. y Williams, D. B. (2003). Key Events in the History of Electron Microscopy. *Microsc. Microanal.*, 9, 96-138.
- Hawkes, P. (Ed.) (1985). *The Beginnings of Electron Microscopy*. Academic Press.
- Hooke, R. (1665). *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon*. Impreso por J. Martyn, y J. Allestry. Royal Society (Londres). Accesible en <https://www.gutenberg.org/ebooks/15491> gracias al Proyecto Gutenberg free e-books.
- Larriba, M. (2020). *Ramón y Cajal. El ocaso de un genio*. Amarante.
- Liu, J. (2021). Advances and Applications of Atomic-Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 27(5), 943-995.
- Mestres Ventura, P. J. (2023). The electron microscopes on the eve of tis first centenary. *European Journal of Anatomy* 27 (1), 111-127.
- Míret, S. (2015). *Mecánica Cuántica*. Colección “Que sabemos de”. CSIC – Libros de La Catarata.
- Reyes Gasga, J. (2020). Breve reseña histórica de la microscopía electrónica en México y el mundo. *Mundo Nano* 13 (25), 79-100.
- Rivera, M. y Arenas, J. (Ed.) (2020). La dimensión nano en la microscopía electrónica [Número completo]. *Mundo Nano*, 13 (25).
- Ruska, E (1979). Die frühe Entwicklung der Elektronenlinsen und der Elektronenmikroskopie. *Acta Historica Leopoldina* 12, 3-136
- Ruska, E. (1987). The development of the electron microscope and of electron microscopy. *Review of Modern Physics*, 59, 627-638.
- Sánchez Ron, J. M. (1997). J. J. Thomson y la génesis del descubrimiento del electrón. *Arbor*, 158(622), 137-171.
- Sánchez Ron, J. M. (2000). Planck, Einstein y los orígenes de la física cuántica. *Arbor*, 167(659-660), 423-436.
- Sanz Serrulla, F. J. (2022). *Cajal y las academias*. AACHE.
- Serena, P. A. (2021). *Nanotecnología para el desarrollo sostenible*. Colección “Que sabemos de”. CSIC – Libros de La Catarata.
- ThermoFisher (2022). *Thermo scientific - exploring uncharted realms with electron microscopy*. ThermoFisher. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Handbooks/Exploring-uncharted-realms-with-electron-microscopy.pdf>
- Thrower, K. (2005). The Fleming Thermionic Diode and the Birth of Electronics. *Transactions of the Newcomen Society*, 75(2), 229-259.
- van Gorkom, J., van Delft, D., y van Helvoort, T (2018). Chapter Two - The Early Electron Microscopes: Incubation. En P.W. Hawkes (Ed.) *Advances in Imaging and Electron Physics*, Vol. 208 (pp 43-128). Elsevier.

Viendo más allá de la luz:

Los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica “Daza de Valdes” (1941-1964)

000 10 μ m 0089

Sergio Barbero Briones

Científico Titular. Instituto de Óptica
“Daza de Valdés” (IO). Consejo Superior de
Investigaciones Científicas (CSIC)

Introducción

Los finales del siglo XIX y principios del XX fueron testigos de la eclosión de una serie de desarrollos técnicos determinantes –los tubos de rayos catódicos, los tubos de vacío, etc.– para la aparición de una nueva rama de la ciencia cuyo fin era comprender y manipular la dinámica de los electrones: la electrónica (Alché, 2025a).

Entender aquellos nuevos dispositivos, capaces de controlar el movimiento de los electrones, requería de modelos físicos que explicasen su dinámica. En 1927, Hans Busch (1884-1973) desarrolló una teoría que modelizaba las trayectorias de los electrones en los tubos catódicos. En su propuesta teórica, una bobina inductora de campo magnético actúa sobre los electrones de manera análoga a como un sistema óptico formador de imágenes modifica un haz de rayos de luz (Busch, 1927). De ahí que el formalismo de la óptica geométrica pudiese aplicarse a la física de electrones utilizando la idea de “lente magnética de electrones”¹. Además, la “longitud focal” de este sistema podía manipularse, de manera continua, simplemente cambiando la corriente eléctrica en la bobina.

¹ Un año antes, en 1926, la analogía óptica también había ayudado a Erwin Schrödinger a postular su afamada ecuación de onda para explicar la mecánica cuántica, por la que recibiría el Premio Nobel en 1933.

Tras la propuesta de Busch, Ernst Ruska (1906-1988), que se encontraba trabajando en el desarrollo de un oscilograma de rayos catódicos en la Universidad Técnica de Berlín –bajo la supervisión de Max Knoll (1897-1969)– utilizó la teoría de Busch para construir un sistema que actuase como una lente magnética de electrones; culminando con éxito su proyecto, consiguió registrar las primeras «imágenes electro-ópticas» en 1929 (Ruska, 1987, p. 610).

Siendo la analogía entre la óptica geométrica y la dinámica de los electrones tan fértil, Knoll y Ruska acabaron acuñando el término: óptica geométrica de electrones (*geometrischen elektronenoptik*)². Una nueva disciplina había nacido: la óptica electrónica. No es de extrañar, pues, que Luis Bru Villaseca (1909-1997) –como veremos, protagonista esencial del desarrollo de la microscopía electrónica en España– en retrospectiva considerase atinadamente que: «la microscopía electrónica se inicia como emulación de la microscopía óptica» (Bru, 1982, p. 38).

² El propio Ruska escribiría: «In analogy to the refraction of light rays at the surfaces (“Grenzflächen”) on passage through optical lenses, I wanted to use, for the electrical lens, the potential steps at corresponding surfaces, which are shaped like glass lenses. Thus, the energy of the electron beams is temporarily changed – just like light beams on passage through optical lenses» (Ruska, 1987).

En aquellos años «gloriosos» de investigación internacional sobre la dinámica electrónica, en España las investigaciones más relacionadas con este ámbito eran las referentes a la determinación de las estructuras cristalinas. Una línea de investigación que se estaba consolidando, en buena parte, por el impulso de la Sección de Rayos X del Instituto Nacional de Física y Química, liderada por Julio Palacios (1891-1970) (Mañes, 2005). Palacios se había hecho cargo de la prestigiosa Cátedra Cajal, uno de cuyos fines era la integración de la ciencia nacional en la esfera internacional. En septiembre de 1928 se celebró el primer curso de la cátedra que congregó, tras un selectivo proceso de selección, a diez jóvenes que tendrían el privilegio de ser formados por uno de los físicos más importantes de Europa: Paul Scherrer (1890-1969) (Mañes, 2005, pp. 47-50; Pérez, 2012, pp. 363-364). Entre ellos, se encontraban dos personas que se convertirían, después de la Guerra Civil, en dos de los artífices esenciales en la conformación de una comunidad epistémica³ en torno a la emergente microscopía electrónica en España; nos referimos a Bru Villaseca, en aquel momento estudiante de ciencias físico-químicas en la Universidad Central,

³ Sobre el concepto sociológico de «comunidad epistémica» aplicado a la historia de la ciencia española del siglo XX ver: (Presas, 2021).

y José María Otero Navascués (1907-1983), de 19 y 21 años, respectivamente. Aquel curso sería determinante para las futuras trayectorias de ambos. Conocer a Scherrer fue decisivo ya que Otero decidió realizar una estancia de un año en su laboratorio, en el Instituto de Física de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Más tarde Otero continuó su formación en el Instituto de Óptica de la Universidad Técnica de Berlín, lugar donde coincidió con Ruska.

En 1931, Ruska, siguiendo las técnicas de la óptica geométrica, trató de aumentar la magnificación de las imágenes que había conseguido en 1929 mediante la combinación de dos “lentes magnéticas”, de la misma manera que en un sistema óptico se puede ampliar la magnificación usando más de una lente óptica. De esta manera consiguió construir el que se considera el primer microscopio electrónico de la historia (Ruska, 1987), aunque con una magnificación muy limitada: 17.4⁴. Había nacido un nuevo tipo de microscopio que, al disponer de un poder de resolución que sobrepasaba al del microscopio óptico, se denominó *Überrmikroskop*; término que a veces se tradujo, al castellano, como hipermicroscopio, otras como

⁴ Es especialmente significativo constatar que Ruska y Knoll llegaron a esta invención desconociendo la teoría de la dualidad onda-materia postulada por De Broglie (Ruska, 1987, p. 613). ¡La aplicación más trascendente del postulado de De Broglie se hizo ajena a su conocimiento! Ruska oyó por primera vez sobre la teoría de De Broglie en el verano de 1931.

ultramicroscopio, o incluso como supermicroscopio; aunque finalmente sobrevivió la no tan superlativa denominación de microscopio electrónico.

Ya que Otero se encontraba este año en Berlín, es más que probable que fuese de los primeros españoles en tener noticia de tan crucial avance. Por su lado, también Bru realizó una estancia, entre 1933 y 1934, bajo la supervisión de Scherrer. Durante este periodo conoció a Busch, quien despertó su interés por la microscopía electrónica (González, 1999). Si Otero vio los primerísimos avances en microscopía electrónica, Bru fue testigo privilegiado del nacimiento del primer microscopio electrónico⁵.

En 1936, Bru escribe el que, quizá, fuese primer artículo divulgativo en España sobre la microscopía electrónica (Bru, 1936). En ese artículo, Bru hace una lúcida exposición de las posibles aplicaciones y potencialidades del nuevo instrumento:

“Una de las mayores aplicaciones que el microscopio de electrones ha encontrado ya, y que con toda seguridad ha de aumentar considerablemente, es en la Biología. [...] Es de esperar que las bacterias podrán ser vistas, y estudiada su estructura, con la ayuda de este nuevo método de observación. [...] Si se compara el camino ya recorrido en esta nueva etapa con el corto espacio de tiempo empleado, se puede pensar, sin sentirse demasiado optimista, que el microscopio de electrones es un nuevo método de trabajo que ha de implantarse en época seguramente no muy lejana”.

Lamentablemente, la Guerra Civil española supuso una ruptura en las incipientes investigaciones en física de electrones dentro de España; en un tiempo, además, en el que la microscopía electrónica nació, como disciplina, en otros países del mundo: Alemania, Bélgica, Estados Unidos, etc. En torno a estos años, un conjunto de tecnologías auxiliares relativas a la generación de campos electromagnéticos, vacío etc., estaban lo suficientemente maduras como para hacer

⁵ De esta manera lo recordaba el propio Bru: (Bru, 1982, p. 32): «Yo mismo, en Zurich, en 1933 conocí, como discípulo de Busch, esta primera etapa, etapa que hay que considerarla como heroica. El calificativo se lo tiene bien merecido. Siempre recuerdo que los diagramas se obtenían fotografiando con una cámara Leica la imagen que aparecía en la pantalla fluorescente del aparato».

viable la construcción de microscopios electrónicos con fines comerciales. En 1938 –mientras Bru se encontraba en la casa de Blas Cabrera, y Otero refugiado en la embajada de Noruega– la casa Siemens desarrolló el primer prototipo de microscopio comercial con una magnificación significativa que permitía su utilización en un importante número de aplicaciones. Por tanto, la Guerra Civil, como en otros campos de la ciencia española, implicó un serio frenazo en un momento crucial en la creación de algunas de las tecnologías esenciales del siglo XX. Aunque, afortunadamente, esa disrupción, como veremos más adelante, no sería irreversible gracias al empuje de algunos de estos protagonistas; en particular Otero y Bru, que no sufrieron las durezas de los procesos de purga posterior.

El microscopio electrónico se convirtió en un dispositivo arquetipo de lo que se ha denominado instrumento «frontera, inventor de disciplinas», y, por ende, «productor de conocimiento» (Santesmases,

2003). No sólo eso, sino que, además, podríamos decir que ejerció como “instrumento puente” entre disciplinas: las físico-ingenieras y las biomédicas. Así, verbigracia, en la España de la segunda mitad del siglo XX el microscopio electrónico fue uno de los instrumentos determinantes para el desenvolvimiento de las nuevas ciencias biomédicas. Los inicios de la microscopía electrónica y su construcción como disciplina en España –especialmente en sus estadios germinales– tienen mucho que ver con la adquisición y uso, por parte del Instituto de Óptica del CSIC, del primer microscopio electrónico instalado en España. Aquí nos centraremos en analizar los actores de este desarrollo: quiénes fueron, cómo aprendieron a utilizar ese microscopio y sus motivaciones. Este artículo está basado en otro previo (Barbero, 2024). En otro artículo curatorial de este catálogo se expone los devenires de la microscopía electrónica española en épocas posteriores (Alché, 2025b).

¿Por qué España debía tener un microscopio electrónico?

Tras la Guerra Civil, los beneficios de adquirir microscopios electrónicos en España fueron reseñados por dos comunidades científicas en apariencia disjuntas: por un lado, físicos e ingenieros y, por otro, biólogos y médicos. Los primeros (Otero, Bru, etc.) fueron plenamente conscientes del potencial de la nueva tecnología ya que, como vimos, fueron testigos de su nacimiento; los segundos, pronto constataron las inmensas posibilidades que el nuevo instrumento ofrecía para sus propósitos.

Toda una nueva rama de la biología, que vino a denominarse microbiología, no hubiese podido desarrollarse plenamente sin el microscopio electrónico. La microbiología, como disciplina de investigación emergente en España, contó con el apoyo decidido del todopoderoso José María Albareda (1902-1966). Tras la Guerra Civil, en 1940, fue nombrado Secretario General del CSIC, convirtiéndose indudablemente en la persona más determinante en esta primera época del CSIC.

Un hito crucial en el afianzamiento de microbiología como disciplina fue la creación del Instituto de Microbiología Jaime Ferrán en 1946, el mismo año que se creó el Instituto de Óptica. Aquel año Julián Sanz Ibáñez (1904-1963), médico de dilatada trayectoria profesional, se convertía en el director del Instituto

Cajal de Biología. También en 1940 Siemens, bajo la propuesta de Ruska, estableció un laboratorio con cinco microscopios electrónicos con la finalidad de que fuesen utilizados por investigadores visitantes; sin duda, la intención era convencerles de los potenciales del nuevo instrumento. Sanz Ibáñez, a la sazón secretario del Instituto Cajal, realizó una estancia en Alemania ese mismo año, y, entre una de las muchas visitas realizadas, estaba la que hizo a Siemens con el objeto de conocer el microscopio electrónico. Según un informe posterior suyo (CSIC, 1942) «el microscopio electrónico es de gran utilidad hoy día para el estudio de los minerales y metales, de los que se obtienen magníficos detalles de estructura, para los virus y estudio de las grandes moléculas.»

A pesar de su limitada actividad dentro de España, Gonzalo Palacios de Borao (1894-1967) merece una mención especial por ser probablemente el primer español en haber usado de manera profusa en sus investigaciones el microscopio electrónico. Durante 1947 realizó sendas estancias en los laboratorios del Institute for Medical Research y los laboratorios de RCA en Camden (Nueva Jersey) (Palacios, 1950). Fruto de estas estancias publicó el primer monográfico extenso sobre los fundamentos y aplicaciones de la microscopía electrónica en España. El texto, titulado

«Supermicroscopía electrónica» (Palacios, 1950) apareció publicado en 1950. En 146 páginas –con abundante número de figuras y láminas fotográficas: 17 y 73, respectivamente– describe de manera pedagógica tanto los fundamentos como aplicaciones de la emergente microscopía electrónica.

Las gestiones en el Instituto Alonso de Santa Cruz

Otero, que a mediados de los años 40 se había convertido en referencia para los gestores de la política científico-tecnológica del CSIC, intentó convencer a las altas instancias del CSIC sobre la necesidad de adquirir un microscopio electrónico. En una nota dirigida a Manuel Lora Tamayo (1904-2002), a la sazón miembro del Consejo Ejecutivo de la Comisión Permanente del CSIC, Otero hábilmente esgrimió dos argumentos: a saber, primero, por qué España debía poseer esa tecnología y, segundo, qué institución debía ser la encargada (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1945):

“Ha de ser un instrumento de investigación extraordinariamente eficaz y cuya necesidad se ha hecho notar a los diferentes sectores de la investigación (Instituto forestal, INTA, Facultad de Ciencias, Cátedra de metalurgia) etc. El Instituto “Alonso de Santa Cruz” es la única entidad que ha seguido en su sección de Óptica el desarrollo de la microscopía electrónica, habiendo coleccionado toda la literatura, que, tanto en América como en Europa, ha aparecido sobre el sujeto”.

Además, en esta misma nota, Otero argüía que uno de los miembros del instituto había realizado una estancia en Suecia, estableciendo una primera toma de contacto directa con un microscopio electrónico. Por otro lado, no es de extrañar, considerando el interés que este instrumento poseía para la microbiología y, en particular, la edafología, que Albareda apoyase la solicitud. Otero consiguió sus propósitos y, en 1943, inició las primeras gestiones para que el Instituto de Física Alonso de Santa Cruz adquiriese un microscopio electrónico de la casa Siemens (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1945). Sin embargo, el elevado coste presupuestado por el modelo Siemens (900 000 pesetas) fue un obstáculo infranqueable para su compra. Dado que, aparte de la casa Siemens, sólo la norteamericana RCA comercializaba microscopios electrónicos disponibles en España (Archivo Histórico Instituto de Óptica,

1945), las gestiones se reorientaron hacia la compañía estadounidense. Se pensó en el modelo EMU-2A, que permitía alcanzar una magnificación teórica de 100 000 aumentos en impresión micro-fotográfica.

Urgía legitimar la utilidad del nuevo instrumento con lo que Otero publicó (Otero, 1944) un detallado y bien documentado artículo («Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico») en Arbor, la revista insignia del CSIC. En el susodicho artículo, Otero enfatizó que la trascendencia del nuevo instrumento radicaba en su extraordinaria capacidad magnificadora en contraste con el microscopio óptico, calificándolo, de esta manera, como: «una revolución en los medios de investigación del mundo microscópico, del mismo orden que lo acontecido al inventarse el microscopio visual en el siglo XVII». Discurso convincente y legitimador se daban la mano en un Otero bien dotado para estas capacidades persuasivas en otros ámbitos.

En última instancia, el objetivo de Otero no era simplemente disponer del instrumento y utilizarlo, además (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1946):

“El uso del instrumento en el nuevo organismo sería destinado a dos fines, uno de ellos el empleo del mismo como elemento investigador y otro, el estudio de su funcionamiento teórico y práctico para poder lograr en su día llegar a la fabricación del mismo en España”.

De la misma manera que Otero pretendía crear una industria nacional de instrumentos ópticos, también veía viable que España pudiese llegar a fabricar sus propios microscopios electrónicos. A pesar de su mayor complejidad tecnológica, no era un objetivo descabellado si consideramos que, a principios de los 50 (Hawkes et al., 1996, p. 10) eran ya varios los países donde se producían microscopios electrónicos. Ahora bien, para que este fin pudiese prosperar era ineludible formar una comunidad de científicos y tecnólogos con las capacidades técnicas y organizativas necesarias.

La adquisición del microscopio RCA EMU-2A y la creación de la Sección de Microscopía Electrónica en el Instituto de Óptica

Tras un largo proceso administrativo repleto de dificultades, en marzo de 1946 el microscopio RCA EMU-2A estaba ya embalado y dispuesto para ser embarcado hacia al Instituto Alonso de Santa Cruz. No obstante, dado que la sección de óptica del susodicho instituto se había transformado por decreto (22 de febrero de 1946) en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” (de ahora en adelante IO), Otero solicitó a Albareda que el microscopio pasase a depender directamente del nuevo instituto (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1946). En la Fig. 1 se muestra una instantánea del Instituto de Óptica cuando el microscopio RCA EMU-2A ya estaba instalado y en pleno funcionamiento.



Fig. 1

Instituto de Óptica en el primer lustro de los años 50. Fondo Fotográfico Biblioteca Dorotea Barnés. Disponible en el Fondo Fotográfico María Teresa Vigón (Identificador: FFMTV195x-00001). <https://www.io.csic.es/FFMTV/ffmtv195x-00001/>

El coste final fueron 350 000 pesetas, sufragadas íntegramente por la Secretaría General del CSIC (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), cantidad claramente elevada para un instituto de nueva creación como el IO; de hecho, esa cifra equivalía al presupuesto total asignado al IO por parte del CSIC para todo el año 1947. El nuevo instrumento era, pues, la joya de la corona del recién nacido instituto.

Tras diversas vicisitudes, los elementos necesarios no estuvieron disponibles hasta agosto de 1947. Un técnico de RCA, un tal Sr. Halma, fue el encargado de realizar el montaje del microscopio. Desde el montaje hasta finales de año se llevaron a cabo labores de puesta a punto del microscopio. El 31 de enero de 1948, el microscopio se inauguró oficialmente con la presencia del Jefe de Estado, el general Franco, lo que da buena cuenta de la importancia institucional que se concedió al instrumento. La Fig. 2 muestra una foto del equipo instalado en el Instituto de Óptica.

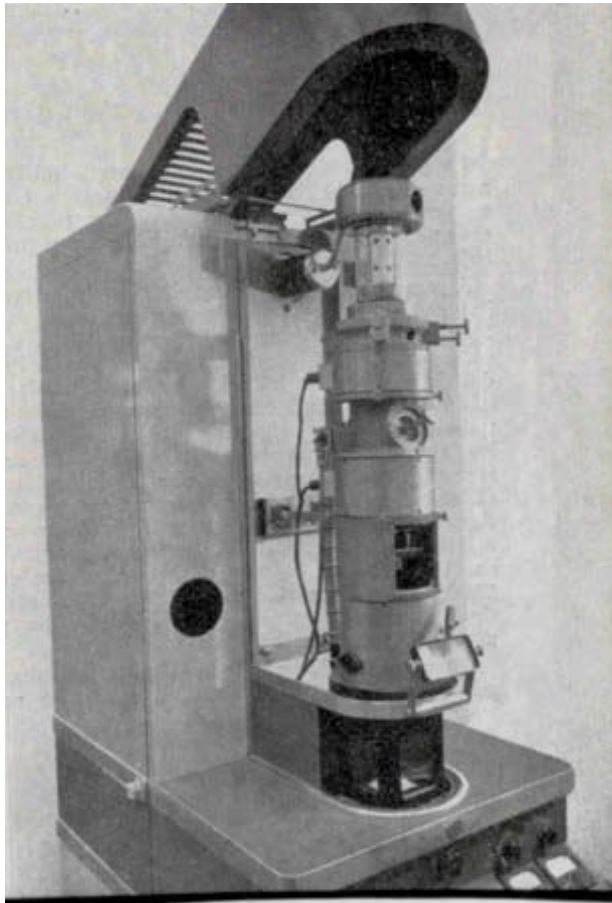


Fig. 2

Fotografía del microscopio RCA EMU-2A instalado en el Instituto de Óptica. Imagen extraída de (Anónimo, 1961).

Durante 1947, de manera paralela a la adquisición del microscopio RCA, se creó la Sección de Foeleetricidad y Óptica Electrónica, bajo la dirección de José García Santesmases (1907-1989)⁶. Además de Santesmases, en enero se incorporó a la sección, también proveniente del Instituto Alonso de Santa Cruz, Justo Mañas Díaz, en calidad de becario honorario. Mañas fue la primera persona que recibió instrucción experimental en el uso del RCA EMU-2A por parte del técnico de RCA, a quien hemos mencionado previamente. Cuando el microscopio empezó a estar operativo, entre finales de 1947 y principios de 1948, la sección quedaba constituida por un jefe de sección, un colaborador y un becario honorario. El nuevo «instrumento frontera» creaba, pues, una novísima línea de investigación dentro del IO.

⁶ Sobre Santesmases ver: <https://dbe.rah.es/biografias/10432/jose-garcia-santesmases>

La puesta en marcha del microscopio (1948-1949)

El microscopio estuvo operativo a finales de 1947. Al año siguiente se organizaron los servicios que se ofrecían a otros institutos del CSIC; con cierta disposición a aquellos relacionados con aplicaciones biológicas (Santesmases, 1949).

Los primeros usos del RCA EMU-2A tuvieron relación con dos enfermedades de etiología bacteriana que lastraban gravemente la salud de la época: la lepra y la tuberculosis (Santesmases, 1949). Las primeras veintidós fotomicrografías⁷ fueron del bacilo de Hansen (*Mycobacterium leprae*) (Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1965). La Fig. 3 muestra la primera fotomicrografía obtenida por el RCA EMU-2A, y por tanto la primera imagen de microscopía electrónica realizada en España. El encargo provino del Institut Biològic de Sarrià. El responsable de esta investigación era el padre Joan Puiggrós Sala (1899-¿?), interesado en desarrollar una vacuna para la lepra. En cuanto a la tuberculosis, la solicitud provino de Eliseo Gastón de Iriarte (1910-1983).

Gastón era profesor analista de los Servicios de Bacteriología y Metabolismo del Hospital Provincial de Madrid que dirigía Gregorio Marañón (1887-1960), donde era el mayor experto en el bacilo de Koch. En la Fig. 4 se muestra una imagen de bacilos de Koch (*Mycobacterium tuberculosis*) obtenida por el RCA EMU-2A e identificada con el número 25. El potencial que ofrecía la microscopía electrónica para aumentar el conocimiento sobre el bacilo de Koch no pasó desapercibido, ya que en 1951 se instaló en el Instituto Antituberculoso Francisco Moragas un microscopio electrónico de la firma Zeiss (modelo EM-8) –el tercer microscopio electrónico instalado en España (González, 1999)–. Si las aplicaciones bacteriológicas fueron los primeros cometidos externos, las primeras investigaciones propias, dentro de la sección, se focalizaron en analizar los procesos de oxidación de ciertos metales y aleaciones usando tanto el microscopio electrónico como un montaje de difracción por electrones.

⁷ Este era el vocablo acuñado para denominar las imágenes registradas por los microscopios electrónicos. Testimonio oral de José Antonio Aznárez Candao (05-08-2023)



Fig. 3

Funda de papel (arriba) y placa de vidrio (abajo) de la primera fotomicrografía adquirida por el microscopio RCA EMU-2A en la que se muestran los negativos de *Mycobacterium leprae*. Obsérvese que la placa está partida y este es el fragmento que se conserva. Archivo MUNCYT.



Fig. 4

Funda de papel (arriba) y placa de vidrio (abajo) con negativos de bacilo de Koch (*Mycobacterium tuberculosis*) adquirida por el microscopio RCA EMU-2A e identificada con el número 25. Archivo MUNCYT.

Con la consolidación del, ya denominado Laboratorio de Óptica Electrónica, se constató la necesidad de normalizar los servicios ofrecidos por el IO en relación al microscopio electrónico, concretamente aquellos orientados a otros institutos del CSIC u otra clase de organismos oficiales e incluso a empresas. Por ello se elaboraron una serie de normas de utilización (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1949), que iniciaban lo que, más adelante, se denominaría un «Servicio de Microscopía Electrónica».

La necesidad de una formación continua en las nuevas técnicas de microscopía electrónica hizo que, en 1949, Santesmases realizase una estancia becada con Vernon Ellis Cosslett (1908-1990)⁸ en el Cavendish Laboratory. Cosslett, además, fue uno de los promotores más activos en la institucionalización internacional de la microscopía electrónica, y, como veremos, sería crucial para la integración española en esta emergente comunidad internacional. Y, sin embargo, aquella estancia tan prolífica en los dos aspectos mencionados, supondría, paradójicamente, una estocada al proyecto de Otero. Santesmases, motivado por su estancia en Cambridge, donde descubrió los últimos avances en computación, y fruto de su propia evolución personal, decidió cambiar de línea de investigación, orientándose

hacia el cálculo electrónico, esto es, la informática. Así, el proyecto de Otero de crear un microscopio electrónico íntegramente español se sustituyó por otro no menos ambicioso de crear un ordenador español. Lo cierto es que la pérdida de alguien tan bien formado, y con capacidades de liderazgo, como Santesmases al frente del proyecto de microscopía electrónica probablemente fuese uno de los elementos determinantes para que, a medio plazo, se acabase por desechar el proyecto de crear un microscopio electrónico español.

Como apéndice final del repaso a estos primeros años mencionamos brevemente dos trabajos de innovación científica relacionados con la microscopía electrónica, los cuales lamentablemente no tuvieron continuidad pero que revelan que el proyecto de Otero no se limitaba a ser meros receptores de tecnologías y ciencias foráneas; existía un afán, más o menos realista, de genuina innovación científica. El primero, la idea de Santesmases y Mañas de desarrollar un espectroscopio electrónico utilizando el fenómeno fotoeléctrico. El segundo, y más singular, fue el trabajo de Ramón Ortiz de Fornaguera (1916-1974). Ortiz, era uno de los físicos teóricos de mayor proyección en España en la década de 1945 a 1955. Otero consiguió que se le concediesen

⁸ Cosslett, pionero de la microscopía electrónica en Inglaterra, fundó en 1947 el Departamento de Microscopía Electrónica en la Universidad de Cambridge.

dos becas para realizar un estudio teórico sobre óptica electrónica. El trabajo de Ortiz condujo a su tesis doctoral, dirigida por Esteban Terradas (1883-1950), en la que Ortiz “geometrizó” el problema de las trayectorias de electrones en un microscopio electrónico utilizando herramientas de geometría diferencial riemanniana⁹. Las ideas geométricas de Ortiz eran ciertamente originales y novedosas, incluso a nivel internacional. A pesar de la indudable calidad de estos trabajos teóricos, Ortiz, atraído por Otero, se trasladó a la Junta de Energía Nuclear. Se frustraba así, esta vez por responsabilidad del propio Otero, la quizá única línea de investigación netamente original y novedosa, a nivel internacional, en microscopía electrónica dentro de España.

Objetos y actores (1949-1960)

Tras lo que podríamos denominar como periodo fundacional, desde la llegada del RCA EMU-2A hasta la renuncia de Santesmases, se inició un periodo de reestructuración y afianzamiento que abarcaría esencialmente la década de los años 50.

⁹ Abstracción geométrica, a partir del trabajo de Bernhard Riemann (1826-1866), del concepto de superficie a dimensiones mayor que tres, en las que las propiedades geométricas cumplen ciertas propiedades y varían suavemente de un punto a otro. La geometría riemanniana tiene como casos particulares a otras geometrías como la euclidiana.

Actores y organización institucional dentro del IO

Mañas tomó el relevo de Santesmases como responsable de la sección de óptica electrónica. Fernando Catalina Perea (1925-1994) se incorporó como estudiante de doctorado y Julia María González Peña (1925-2010) como colaboradora científica del IO. La Fig. 5 muestra a algunos de los investigadores de la sección de óptica en esta época. En 1952 las capacidades experimentales de la sección se incrementaron considerablemente gracias a la puesta en marcha de un aparato de vaporización en alto vacío que se había construido en el Instituto Torres Quevedo, lo cual permitió, por un lado, la construcción de espejos y superficies metálicas y, por otro, completar las técnicas propias del microscopio electrónico. El desarrollo de la técnica de vaporizaciones metálicas conllevaría la creación de una línea de investigación propia, de largo recorrido, dentro del IO (aún hoy se mantiene) que proporcionaría servicios tanto a los investigadores del propio instituto como de otros centros. En 1953 la sección, ahora denominada Sección de Óptica Electrónica, había conseguido desarrollar ciertas competencias de desarrollo instrumental ligadas al microscopio.



Fig. 5

Fotografías (obtenidas de sus expedientes personales) de algunos de los investigadores del IO relacionados con la microscopía electrónica. De izquierda a derecha: Fernando Catalina Perea; Antonio Camuñas Puig; Julia María González Peña.

A pesar de estos diligentes avances, en 1953 Mañas cesó como jefe de sección (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956); una nueva discontinuidad, tras la de Santesmases, que volvía a producir inesperados retrocesos. El sustituto de Mañas como responsable de sección fue Catalina, manteniéndose González Peña como colaboradora. Sin embargo, el devenir de la sección cambió de manera determinante con la llegada de Luis Bru a Madrid. En 1955 Bru obtuvo la Cátedra de Física Teórica y Experimental en la Universidad de Madrid. No obstante, tras asentarse en la capital, manifestó a Otero su interés por incorporarse al Instituto de Óptica.

Otero acogió con entusiasmo la disposición de Bru, y eficazmente consiguió la creación de un nuevo departamento («Departamento de Difracción y sus aplicaciones») que permitió a Bru continuar con

sus investigaciones en difracción de electrones. Cuando Bru se incorporó al IO, se encontraba dirigiendo la tesis doctoral de Rafael Márquez Delgado y de Felicísimo Ramos Fernández, los cuales se integraron dentro del IO ese mismo año. Por otro lado, en 1957 se inició el empleo, en serie, de la técnica de réplicas, por lo que el microscopio adquirió unas capacidades muy similares a las de otros laboratorios europeos (Anónimo, 1961); lo cual permitió incrementar considerablemente el número de servicios externos.

Circulación de saberes

Desde sus inicios, el IO se constituyó como una institución en la que la formación científico-técnica era un eje esencial, máxime cuando la necesidad de formar a un cuadro de profesionales en nuevas disciplinas, tales como la microscopía electrónica, era perentoria. En primera instancia, dada la ausencia de expertos en España, se requería la formación por parte de investigadores y técnicos foráneos; lo cual se articuló tanto a través de la visita de éstos al IO como a través del pensionado de investigadores españoles en el extranjero.

En cuanto a la estancia de investigadores extranjeros en el IO, la más relevante fue, sin duda, la de Cosslett en 1950. Durante su visita al IO, Cosslett impartió una serie de conferencias sobre microscopía electrónica. Las estancias de investigadores españoles en el extranjero fueron, desde el principio, numerosas.

En 1951, González Peña viajó a varios laboratorios de microscopía electrónica en Holanda, Bélgica y Francia. Catalina realizó una estancia de un año (1953-1954) en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt de Braunschweig, bajo la supervisión de Hans Boersch (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), con objeto de realizar un estudio sobre la corrección de la aberración cromática, presente en la microscopía electrónica. Felicísimo Ramos estuvo en el Imperial College de Londres investigando la influencia de los haces de electrones sobre los depósitos de níquel. Rafael Márquez investigó en el Laboratorio de Microscopía y Difracción de Electrones del CNRS en París, bajo la dirección de Trillat.

La asistencia a congresos internacionales fue, por supuesto, otra vía de adquisición de saberes y establecimiento de relaciones. Aparte de las reuniones internacionales de microscopía electrónica, que contaron siempre con representantes españoles, también fue habitual la asistencia a reuniones de índole más regional. Por ejemplo, en 1960 Bru, Catalina y Camuñas acudieron a la Conferencia Europea de Microscopía Electrónica que se celebró en la Haya y Delft entre el 28 de agosto y el 3 de septiembre.

La utilización de un instrumento tecnológicamente tan complejo como el microscopio electrónico involucraba no sólo saberes teóricos sino también, y en mayor grado, un saber de índole práctico, consistente en una serie de destrezas en el manejo y preparación de muestras, puesta a punto

y reparación de elementos accesorios, etc. todo lo cual sólo se podía adquirir utilizando o viendo utilizar el microscopio. A partir de 1952, el IO empezó a admitir la visita de investigadores y técnicos –tanto nacionales como internacionales– con la finalidad de que estos se formasen tanto en el manejo del microscopio como en las técnicas de preparación de muestras; indudablemente una eficaz forma de irradiar el conocimiento práctico del microscopio.

También se organizaron cursos, más o menos extensos. A partir de 1949 se empezó a impartir en el IO el Curso de Óptica Superior; un curso que tenía una duración de dos años divididos en cuatro semestres y en el que, entre otros, se enseñaban los fundamentos de la óptica electrónica en una asignatura que duraba un semestre denominada «Técnicas electrónicas y óptica electrónica». Entre los cursos impartidos en el IO destaca el Curso de Microscopía, que tuvo lugar del 5 al 14 de diciembre de 1960. Aunque este curso estaba orientado tanto a microscopía óptica como electrónica, la parte de microscopía electrónica tenía un notable peso. El curso constaba de seminarios, conferencias y demostraciones. Los asistentes pudieron realizar una serie de prácticas, de manera individualizada, con distintos tipos de microscopios, incluido el electrónico (Anónimo, 1961).

En último lugar, ya en la década de los 60, gracias a la existencia de una muy bien editada revista de divulgación: Luz: Revista de información del

Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, se elaboraron una serie de artículos divulgativos y noticias relacionadas con la microscopía electrónica tanto en el IO como en otros lugares. Catalina escribió un artículo seminal en la revista (Catalina, 1960): «La microscopía electrónica como técnica moderna», donde se anunciaba la consiguiente publicación de artículos específicos sobre las aplicaciones de la microscopía electrónica en la metalurgia, mineralogía, microbiología, física del estado sólido, medicina, etc. El segundo artículo apareció al año siguiente (Anónimo, 1961), pero, por razones desconocidas, los siguientes no llegaron a aparecer.

La Sociedad Española de Microscopía Electrónica

Durante los años cuarenta del siglo pasado se crearon las primeras sociedades, o agrupaciones, nacionales de microscopía electrónica: Electron Microscope Society of America (EMSA) en 1944, el grupo de microscopía electrónica del Institute of Physics en Gran Bretaña en 1946, la Sociedad Escandinava de Microscopía Electrónica (SCANDEM) en 1948, etc. Los primeros intentos de crear una federación internacional que aglutinara las sociedades nacionales de microscopía electrónica tuvieron lugar a finales de los 40 y principios de los 50, bajo el auspicio de la International Council of Scientific Unions (ICSU) (Cosslett, 1996). Finalmente, en 1955, se conformó una federación internacional

independiente bajo la denominación de International Federation of Electron Microscopy Societies (IFEMS) (Cosslett, 1996). Uno de sus principales promotores, y primer secretario, fue Cosslett, que más tarde ayudaría decisivamente a la comunidad española en su integración internacional. Los nueve países miembros fundacionales de esta sociedad eran: Bélgica, Francia, Alemania, Gran Bretaña, Japón, Suecia, Suiza y Estados Unidos. En España, como relata Rafael González Santander (González, 1999):

Hacia 1956 los contactos entre los investigadores españoles propiciaron la necesidad de aglutinar a todos ellos en una sociedad científica que tendía a agrupar a todas las personas y Centros Nacionales que tenían el común denominador de utilizar el microscopio electrónico para sus investigaciones.

Se atisbaba que una sociedad, o comité, era la manera idónea de articular esta comunidad. Ésta, además, debía integrarse en la comunidad internacional. Como en otras ramas de la ciencia, muy especialmente la óptica (Barbero, 2021), la integración internacional sirvió de acicate para la construcción nacional. En 1956 se celebró la primera reunión de la Federación Internacional de Sociedades de Microscopía Electrónica –durante el III Congreso Internacional de Microscopía Electrónica que tuvo lugar en Estocolmo entre los días 16 y 21 de

septiembre–. Bru y Catalina acudieron representando a España. Tal como informó posteriormente Bru, se consiguió que la Federación admitiese a España, lo cual obligaba formalmente a la creación de un comité o sociedad nacional. En consecuencia, tras regresar del congreso, los investigadores del IO iniciaron los trámites para la constitución formal de la Sociedad Española de Microscopía Electrónica (de ahora en adelante SEME).

Se redactó un primer borrador de los estatutos de la sociedad; documento que lamentablemente se ha perdido (González, 1999). La Junta Directiva, nombrada de manera provisional, fue la siguiente: Luis Bru Villaseca (presidente); Fernando Catalina Perea (secretario); Julia María González Peña (tesorero); y como vocales: Miguel Rubio Huertos, Antonio Camuñas, Rafael Márquez Delgado y Juan José Alonso Pascual. Todos ellos estaban vinculados al CSIC y cinco adscritos, a tiempo completo o parcial, al IO y que, de una manera u otra, habían sido usuarios del RCA EMU-2A del IO. Todo lo cual revela la importancia capital del CSIC en general, y el IO en particular, en la construcción de esta comunidad epistémica. De ahí que la SEME fijase su domicilio en el IO. En su fundación la SEME contó con una docena de socios (González, 1999, p. 35). A través de la intercesión de Cosslett –recordemos su estrecho contacto con investigadores españoles– se consiguió el ingreso formal de la SEME en la rebautizada como International Federation of

Societies for Electron Microscopy (IFSEM), lo cual tuvo lugar durante la celebración del IV Congreso Internacional de Microscopía Electrónica en 1958. La legalización formal de la sociedad, dentro del restrictivo marco jurídico franquista, tuvo que esperar una década, hasta 1967, debido a la ausencia de una ley de asociaciones¹⁰, por lo que la sociedad funcionó durante el interin con unos estatutos provisionales.

De los bacilos al uranio

Como vimos, los primeros encargos de fotomicrografías que se recibieron en el IO fueron hechos con la finalidad de estudiar microbiología patógena. Estos cometidos continuaron en los inicios de los 50, verbigracia, con investigaciones relacionadas con el análisis del ciclo evolutivo del bacilo de Koch y la observación del tejido pulmonar afectado por éste. Las fotomicrografías también sirvieron para empezar a evaluar el potencial terapéutico de ciertos tratamientos. Por ejemplo, destacamos una investigación que se llevó a cabo con el Patronato Nacional Antituberculoso, en el que se evaluaron los efectos de la hidrácida del ácido isonicotinico como tratamiento de la tuberculosis pulmonar en pacientes del Sanatorio de Alcohete

(Guadalajara). Para finalizar con el ámbito de la microbiología patógena, mencionamos, por su singularidad, el uso que se hizo del microscopio durante la epidemia de gripe (conocida como asiática) de 1957-58 que, sólo en España, causó alrededor de 10 000 fallecimientos. El doctor Laureano Albaladejo consiguió aislar y cultivar el virus y encargó alrededor de 15 fotomicrografías del virus (alguna de las cuales aparece en la Fig. 6). La noticia del logro tuvo una notable repercusión mediática y algunas de las fotos obtenidas aparecieron en la prensa, como la reproducida en el diario Pueblo¹¹.

Como vimos, sin el apoyo de Albareda no hubiese sido posible adquirir el microscopio RCA EMU-2A. Por lo que no es de extrañar que fuesen numerosas las colaboraciones mantenidas con investigadores en edafología y áreas relacionadas. Uno de los estudios más destacados fue el liderado por Miguel Rubio sobre morfología de ciertos virus patógenos de las plantas, investigación en la que se obtuvieron micrografías pioneras sobre algunos de estos virus con forma esférica. Otra de las líneas de investigación del Instituto de Edafología, que requirieron del RCA EMU-2A, fue el estudio físico-químico de las arcillas y caolines de suelos y tierras de moldeo españoles,

¹⁰ La cual no apareció hasta 1964. Ley reguladora de asociaciones (Ley 191/1964). BOE 311 de 28 de diciembre de 1964.

¹¹ En el artículo del diario Pueblo (p. 17, Madrid, martes 3 de diciembre de 1957) se afirmaba lo siguiente: «Esta fotografía se ha tardado en hacer dieciséis horas. En ella se aprecia perfectamente este virus que solamente se ha fotografiado tres veces en el mundo: en Singapur, en Estados Unidos y ahora en España. Colaboraron con el doctor Albadalejo don José María Otero y don Fernando Catalina, encargado del departamento de Óptica».

algo que poseía un clarísimo interés tecnológico debido al uso de éstas como materia prima de la industria cerámica nacional. González Peña fue la responsable de coordinar esta línea de trabajo, iniciada en 1952, y que se extendió varios años. El número de fotomicrografías llegó a ser tan numeroso que propició que, en 1954, se firmase un acuerdo que estipulaba que la mitad del salario de González Peña fuese sufragado por el Instituto de Edafología, y, la otra mitad, por el de Óptica.



Fig. 6

Funda de papel (arriba) y placa de vidrio (abajo) con negativos del virus de la gripe asiática adquirido por el microscopio RCA EMU-2A. Estas micrografías, identificadas con el número 681, fueron obtenidas el 27 de noviembre de 1957. Archivo MUNCYT.

Otro de los investigadores involucrado en el estudio de las arcillas fue José María Serratosa (1924-2012), persona que, pasado el tiempo, acabaría asumiendo un papel fundamental en el desarrollo de la ciencia y tecnología de materiales en España, particularmente en el CSIC. Serratosa es un ejemplo de investigador que, aun no siendo personal del IO, pudo utilizar directamente el microscopio. Otro caso es el de Juan José Alonso Pascual, investigador del Instituto de Edafología, que ostenta el mérito de ser la persona externa al IO que más veces usó el RCA EMU-2A, según se puede comprobar consultando el libro de registros del microscopio.

Si bien la microbiología y, en particular la colaboración con el Instituto de Edafología, fue, al principio, la predominante, poco a poco el tipo de aplicaciones se fue diversificando, especialmente aquellas relacionadas con la estructura de materiales; algunas con un marcado interés industrial y, por ende, provenientes de empresas productoras de bienes o centros tecnológicos asociados. Por ejemplo, en 1952 se acometió un estudio sobre la morfología de la lana en colaboración con el Centro de Estudios Laneros de Béjar. Dentro de estas investigaciones, de interés industrial, destacamos una colaboración que es representativa de lo productiva que empezaba a ser la interacción entre el IO y la industria privada; nos referimos a la establecida con el grupo INDO, dedicado al sector de las lentes oftálmicas. Se analizó como afectaba el proceso de mecanizado –en sus distintas

fases: desbaste, afino y pulido– sobre las superficies ópticas de las lentes oftálmicas.

Mención especial merece la utilización del RCA EMU-2A en el programa nuclear español. En buena medida, aquel programa se consideraba factible por la presencia de reservas de uranio en territorio español. Así, pues, uno de los primeros objetivos de la Junta de Energía Nuclear (JEN) fue articular un conjunto de servicios específicos con todo lo relativo a la prospección y procesado de las muestras extraídas de los yacimientos de uranio. Dentro de estos servicios se encontraba el Laboratorio Petrográfico, instalado en 1953 y dirigido por el joven geólogo Enrique Mingarro (1926-1998). El laboratorio estaba encargado del análisis de muestras de minerales recogidas; objetivo para el cual contaba con dos gabinetes de microscopía, uno de óptica y otro de electrónica.

El Gabinete de Microscopía Electrónica del Laboratorio Petrográfico se pudo crear gracias al acuerdo entre la JEN y el IO, iniciado en 1956, el cual permitía a la JEN utilizar el RCA EMU-2A del IO. En general se estudiaron, sobre todo, arcillas producidas en rocas cercanas a filones uraníferos y las formas elementales de los estados pre-cristalinos y amorfos de la pechblenda. Un ejemplo de las fotomicrografías obtenidas en estos estudios se muestra en la Fig. 7. Fruto de esta colaboración, Catalina fue nombrado, en septiembre de 1958, uno de los representantes de la comisión española en la II Conferencia Internacional Atómica para usos pacíficos.



Fig. 7

Funda de papel (arriba) y placa de vidrio (abajo) con negativos de réplicas de pechblenda española adquiridos por el microscopio RCA EMU-2A. Estas micrografías, identificadas con el número 659, fueron obtenidas el 22 de julio de 1957 por el Dr. Catalina. Archivo MUNCYT.

Tiempos de relevo institucional e instrumental (1960-1964)

En septiembre de 1960 el laboratorio de Bru, en conformidad con el Instituto de Óptica, se trasladó a la Universidad de Madrid. Aunque Otero solicitó que el traslado se limitase a la sección de difracción de electrones, era inevitable que acabase afectando a las actividades relacionadas con la Sección de Óptica Electrónica. Con todo, Bru mantuvo su cargo de director del departamento de difracción dentro del IO, aunque su actividad fue progresivamente menguando, manteniéndose, quizá, únicamente por la estrecha relación científica que mantenía con Catalina. En 1961 la Sección de Óptica Electrónica contaba con sólo dos personas: Catalina, como responsable, y un único colaborador.

A pesar de todos estos reveses, en 1964 el IO adquirió un nuevo microscopio electrónico, de la casa Siemens, modelo Elmiskop 1A, que al disponer de un poder de resolución de 0.4 nm y 200 000 aumentos pasaba a sustituir al ya decano modelo RCA EMU-2A. Desde la llegada del nuevo microscopio electrónico al IO, sólo se realizaron cuatro fotomicrografías más con el RCA EMU-2A: una por año hasta la última, que figura en el libro de registros, con fecha de 14 de octubre de 1968. Por tanto, esta fecha simboliza la “defunción” de este protagonista tan esencial de la historia de la microscopía electrónica en España. Aunque el RCA EMU-2A cayó en desuso, permaneció

en su ubicación original hasta el 2009, año en el que fue donado al Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (MUNCYT).

A pesar de la adquisición del nuevo microscopio electrónico, la influencia del IO en la microscopía española, hasta la fecha dominante, empezaba a mermar. Eran tiempos de relevo institucional. En 1957 se creó el Centro de Investigaciones Biológicas (CIB), donde se habilitó un Servicio de Microscopía. Este servicio acaparó buena parte de los encargos de microscopía electrónica sobre microorganismos realizados dentro del CSIC. Sin embargo, sería el Servicio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Madrid, dirigido por Bru, el que adquiriese el estatus de nuevo centro de referencia, al menos en Madrid. Además, durante estos años aparecen servicios de microscopía electrónica en otras ciudades españolas. El IO dejaba de ser el centro de referencia indiscutible en Madrid, y, esta ciudad dejaba de ser el centro monopolizador de la microscopía electrónica en España.

Conclusiones

Como hemos visto, durante los primeros años del franquismo el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” fue la institución cardinal para la introducción de la microscopía electrónica, como nueva disciplina tecnológica, en España. Esta influencia se canalizó a través de dos labores: 1) la difusión de los potenciales que ofrecía la microscopía electrónica (gracias al uso del microscopio RCA EMU-2A) a una amplia variedad de científicos, tecnólogos, instituciones y empresas; 2) la formación de una primera comunidad epistémica en torno a la microscopía electrónica (que se institucionalizaría en la Sociedad Española de Microscopía Electrónica) y que, mediante un movimiento de “irradiación”, acabaría extendiéndose por toda España. La función de institución promotora no implica exclusividad –verbigracia, en el caso catalán–, aunque es evidente que el IO fue centro de referencia en la medida en que innovó modelos de aprendizaje y organizativos.

A pesar de las discontinuidades previamente señaladas, en el periodo que abarca desde 1947 a 1967, se realizaron 2.605 negativos, se redactaron 36 informes, se publicaron un total de doce trabajos de investigación científica (nacionales e internacionales) (Anónimo,

1961; Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), y se leyeron dos tesis doctorales sobre el microscopio en cuanto a instrumento se refiere. La consolidación de la microscopía electrónica durante la década de los sesenta se asentó en los cimientos establecidos en la década anterior, gracias a investigadores que en algún momento u otro interaccionaron con el modelo RCA EMU-2A. Todo ello justifica la conceptualización de este microscopio del IO como: «instrumento frontera» e instrumento puente entre disciplinas.

En los años 60, la comunidad epistémica de microscopía electrónica española se encontraba suficientemente extendida tanto en el ámbito disciplinar (biólogos, médicos, ingenieros, físicos) como geográfico (CSIC, Universidades e incluso centros de salud pública), por lo que requería de una institución de amplia implantación estatal que es en lo que se convertiría la Sociedad Española de Microscopía Electrónica (SEME) durante la década de los 60, especialmente tras su legalización formal en 1966¹². La evolución de la microscopía electrónica en España en las siguientes décadas se trata en el siguiente artículo de este catálogo (Alché, 2025b).

¹² Desde 1967 se realizarían reuniones y asambleas anuales. La I Reunión Anual Científica y Asamblea de la SEME se celebró el 13 de abril de 1967 en el Salón de Conferencias del Instituto de Óptica (González, 1999, p. 90).

Referencias

Alché Ramírez, J. D y Serena, P. A. (2025a). La microscopía electrónica. Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica. Artículo curatorial en este mismo catálogo.

Alché Ramírez, J. D y Serena, P. A. (2025b). Ocho décadas de microscopía electrónica en España. Artículo curatorial en este mismo catálogo.

Anónimo, (1961). Instituto de Óptica de Madrid. La investigación en óptica y microscopía electrónica. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica “Daza de Valdés”*, 7(Nov-Dic), 8-11.

Archivo Histórico Instituto de Óptica. (1945). *Nota para el Sr. Lora. Escrita probablemente por José María Otero Navascués en fecha alrededor de noviembre de 1945.*

Archivo Histórico Instituto de Óptica. (1946). *Carta del secretario del Instituto Nacional de Física Alonso de Santa Cruz al secretario del CSIC, 4 de marzo de 1946.*

Archivo Histórico del Instituto de Óptica (1947). *Carta de Otero Navascués al presidente del CSIC, 20 de enero de 1947.*

Archivo Histórico del Instituto de Óptica (1949). *Normas que han de seguirse en la Sección de Óptica Electrónica del Instituto de Óptica “Daza de Valdés” para realizar investigaciones con el microscopio electrónico en colaboración con otros centros.* 23 de marzo de 1949.

Archivo Histórico Instituto de Óptica. (1956). *Instituto de Óptica 1946-1956.*

Barbero, S. (2021). El nacimiento de la Sociedad Española de Óptica: De la integración internacional a la construcción nacional (1946-1970). *Óptica Pura y Aplicada*, 56(1), 1-16.

Barbero, S. (2024). Viendo más allá de la luz: El inicio de la microscopía electrónica en España a través de su primer microscopio electrónico (1941-1964). *Óptica Pura y Aplicada*, 57 (2) 51172.

Bru Vilaseca, L. (1936). El microscopio de electrones. *Revista Las Ciencias de Madrid*, III(1), 1-11.

Bru Vilaseca, L. (1982). *Cincuenta años de difracción y microscopía electrónica.* Universidad de Santander.

Busch, H. (1927). Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. *Arch. Elektrotechnik* 18, 583-594.

Catalina, F. (1960). La microscopía electrónica como técnica moderna. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica “Daza de Valdés”*, 2(Nov-Dic), 39-42.

Catalina, F. (1962). La microscopía electrónica en España. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica “Daza de Valdés”*, 10(Mayo-Junio), 43-45.

Cosslett, V. E. (1996). Early history of the International Federation of Societies for Electron Microscopy. En Mulvey, T. (ed.) *The Growth of Electron Microscopy. Advances in Imaging and Electron Physics.* Academic Press, 3-20.

CSIC (1942). *Memoria del CSIC de los años 1940-1941.*

CSIC (1950). *Memoria del CSIC del año 1949.*

González Santander, R. (1999). *La microscopía electrónica española en la investigación científica 1946-1999 (Sociedad Española de Microscopía Electrónica 1956-1999).* Universidad de Alcalá de Henares.

Hawkes, P. W. & Kasper. E. (1996). *Principles of electron optics: Basic geometric optics Vol I.* Academic Press.

Mañes Beltrán, X. (2005). *Determinación de estructuras cristalinas en España: inicios, desarrollo y consolidación.* [Tesis de doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona].

Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (1965). *Libro de registros del microscopio RCA EMU-2A (1947-1965).*

Otero, J.M. (1944). Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico. *Arbor*, Enero(1), 85-102.

Palacios de Borao, G. (1950). *Supermicroscopía electrónica.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Pérez Fernández, C. (2012). *José María Otero Navascués. Ciencia y Armada en la España del siglo XX.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Presas i Puig, A. (2021). Epistemic Communities and Science Makers in the Franco Regime. A Study of the Nuclear Energy Board. En M. Janué i Miret y A. Presas i Puig (Eds.), *Science, culture and national identity in Francoist Spain 1939-1951.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Ruska, E. (1987). The development of the electron microscope and the electron microscopy, *Rev. Mod. Phys.* 59(3) 627-638. (1932-1982).

Santesmases, J. G. (1949). *Resumen de la labor realizada por D. José García Santesmases, Jefe de la Sección de Óptica Electrónica.* Archivo Histórico del Instituto de Óptica.

Santesmases, M. (2003). Neutralidades y atrasos: ciencias y tecnicismo en la España de Franco. En *Actes de la VII Trobada d'Història de la Ciència i de la Tècnica.* IEC, 63-78.

Ocho décadas de microscopía electrónica en España

Juan de Dios Alché Ramírez

Investigador Científico. Estación Experimental
del Zaidín (EEZ). Consejo Superior de
Investigaciones Científicas (CSIC)

Pedro Amalio Serena Domingo

Investigador Científico. Instituto de Ciencia de
Materiales de Madrid (ICMM). Consejo Superior
de Investigaciones Científicas (CSIC)

Preámbulo

En los dos artículos curatoriales precedentes se han abordado temáticas bien diferenciadas. En el primero (Alché y Serena, 2025) se ha hecho una breve reseña histórica sobre las invenciones del microscopio electrónico y del microscopio de efecto túnel, así como de la forma en la que estos instrumentos operan, sus aplicaciones, y la evolución que estas técnicas microscópicas van a tener en un futuro. En el segundo (Barbero, 2025) se ha profundizado sobre la implantación de esta técnica en España y la nucleación de una pequeña, pero muy activa, comunidad científica experta en microscopía electrónica. En este tercer artículo se hace un recorrido algo más amplio por la historia de la microscopía electrónica en España, incorporando en el discurso los diversos equipos que forman parte de la exposición “Gigantes para ver lo diminuto. Microscopía electrónica”, todos ellos

instalados entre la década de 1940 y la de 1980. Este recorrido no será excesivamente profundo debido al número de equipos exhibidos y a las limitaciones del propio catálogo. Además, es imposible reducir a unas cuantas páginas la actividad desarrollada en ocho décadas por miles de personas en innumerables departamentos universitarios, centros de investigación o servicios científico-técnicos. El presente artículo se centra en mostrar la evolución de los microscopios electrónicos, utilizando para ello los equipos que forman parte de la exposición, en mencionar para qué se utilizaron, y conocer a algunas de las personas que estuvieron vinculadas a dichos equipos. Estas personas son una mínima representación de la amplia comunidad científica española que consiguió estar en la vanguardia de esta técnica superando todo tipo de adversidades y condicionantes.

La ciencia en España: investigar en tiempos revueltos

En las últimas dos décadas se han publicado numerosos artículos y libros en los que se describen las turbulentas relaciones de España con la ciencia moderna (Sanz Menéndez, 1996; Otero Carvajal et al., 2006; Sánchez Ron, 2003a, 2003b, 2003c; Puig-Samper Mulero, 2007; Romero de Pablos y Santesmases, 2008; González Ibáñez y Santamaría García, 2009). Estas relaciones solo se comprenden en la evolución de los contextos histórico, económico y social de nuestro país a lo largo de los últimos dos siglos.

En lo que hay cierto consenso es en considerar que el lento declive de España a lo largo de los siglos XVII y XVIII, coincidió con el auge de otras potencias en las que tuvo lugar un gran desarrollo científico-tecnológico. España pudo mantener un buen nivel científico en el siglo XVIII, gracias al empuje de una monarquía ilustrada como la representada por algunos soberanos de la dinastía de los Borbones. Sin embargo, los acontecimientos históricos de finales de dicho siglo y de gran parte del siglo XIX propiciaron que el país tomase una senda algo alejada de la de construir un competitivo tejido industrial y un sólido sistema académico. Recordando los sucesos que aparecen en los libros de nuestra historia, en este aciago periodo se sucedieron invasiones, guerras contra potencias extranjeras, levantamientos militares, la pérdida de los

territorios continentales americanos, varios conflictos bélicos internos, persecuciones políticas, cambios de régimen, etc. Sin duda el contexto inestable, junto con una inercia social poco dada a los cambios, fueron poco propicios para planificar y potenciar la educación, la ciencia y la tecnología tal y como se hacía en otros países. De esta forma, la investigación española no se enganchó a la gran corriente de desarrollo científico-tecnológico que se fue desarrollando a lo largo del siglo XIX en Gran Bretaña, Francia, Alemania y, de forma incipiente, en EE.UU.

Durante ese mismo siglo, la universidad española siguió instalada en una docencia principalmente orientada hacia la repetición de contenidos de otras épocas a los que se añadían novedades puntuales procedentes del exterior, pero sin realizar contribuciones relevantes al conjunto de estos nuevos conocimientos. Como suele ocurrir, toda norma tiene su excepción y en el campo de la medicina se dieron algunas individualidades, entre las que destaca Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) quien, con esfuerzo y empeño personal, pudo hacerse un hueco en la escena científica internacional.

La guinda a esta situación de estancamiento fue la guerra contra EE.UU., en la que España perdió sus últimos territorios en América y Asia en 1998. La consternación generada por esta pérdida impulsó

el Regeneracionismo, que ya se venía propugnando por ciertos sectores sociales en las últimas décadas del siglo XIX. El Regeneracionismo representó un intento de cambio de rumbo para subirse a todos esos carros que habían pasado de largo, incluidos el de la ciencia moderna y el del desarrollo tecnológico. Este movimiento también recibió el influjo de ideas procedentes de instituciones como la Institución Libre de Enseñanza (ILE) o de experiencias desarrolladas en otros países. En el ámbito académico era notorio que se necesitaba una renovación de personas, infraestructuras y dinámicas de trabajo. El liderazgo científico de Cajal fue incontestable tras recibir el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1906, lo que le convirtió en un referente científico nacional. Sin embargo, tan importante como su actividad científica fue su compromiso por reorganizar la estructura de la ciencia en el país. De esta forma aceptó presidir la Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (JAE) desde el momento de su fundación en 1907. El trabajo de Cajal junto con el de José Castillejo Duarte (1877-1945), secretario de la JAE, se prolongó durante casi tres décadas, diseñando y manteniendo diversas actuaciones estratégicas a pesar de las constantes turbulencias políticas, tan propias de nuestro país.

Esta combinación de estabilidad institucional y liderazgo académico permitió poner en marcha un modelo nuevo, a la vez que se dispuso de tiempo para corregirlo con el fin de adecuarlo a las

circunstancias. Este modelo contaba con una serie de premisas básicas. Por un lado, la de formar a nuevas generaciones de investigadores en centros internacionales de referencia mediante un sistema de pensiones (becas) tejiendo una red de relaciones y colaboraciones internacionales, y por otro lado, la de crear laboratorios e institutos científicos homologables a los de otros países, con presupuesto propio, equipamiento avanzado y personal técnico, en los que los investigadores formados en el extranjero se incorporarían para desarrollar sus investigaciones y formar nuevas generaciones de científicos.

El impacto del modelo de la JAE ha sido ampliamente estudiado y supuso un cambio en las formas de trabajo de la comunidad científica española, que buscaba su homologación con la internacional. La llegada de la II República en 1931 o el fallecimiento de Cajal en 1934 no supusieron un gran cambio en la estrategia desarrollada por la JAE, que durante el primer tercio del siglo XX fue consolidando una moderna red de centros de investigación. Sin embargo, la sublevación militar de 1936, la posterior Guerra Civil, la derrota del Gobierno de la República, y la instauración de una dictadura de corte nacional-católico por parte del general Francisco Franco supusieron una clara discontinuidad en la trayectoria de la ciencia española.

La creación en 1939 del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), recoge los institutos creados por la JAE, expande su radio

de acción a diversas universidades no ubicadas en Madrid, a la vez que reanuda las actividades investigadoras apoyándose en una comunidad científica diezmada por el exilio o la depuración política, procesos que generaron vacantes que fueron ocupadas por personas con afinidad ideológica con el régimen franquista. El CSIC incorporó entre sus objetivos el de proporcionar cobertura científico-tecnológica a la menguada industria del país. Todo ello se realizó bajo el diseño y control de José Ibáñez Martín (1896-1969), ministro de Educación Nacional entre 1939 y 1951 y primer Presidente del CSIC, y de José María Albareda (1902-1966) que ocupó el cargo de Secretario General de esta institución entre 1940 y 1966. La reorganización en torno al CSIC, y otros organismos más pequeños, condicionaron la evolución de la ciencia española durante buena parte de la segunda mitad del siglo XX. Otro aspecto a destacar de la ciencia de la posguerra fue la escasez de recursos, reflejo de un momento en el que otras prioridades reclamaban mayor atención y esfuerzo por parte de las autoridades del país.

Se debe subrayar que hubo ciertos modos de trabajo y de hacer ciencia instaurados por la JAE que se mantuvieron en la comunidad científica del CSIC (Santesmases, 2007). Por ejemplo, se siguió priorizando la formación de investigadores en prestigiosos centros extranjeros, manteniendo y ampliando las redes de contactos con el mundo académico internacional. También se consideró

indispensable la adquisición de equipamiento moderno, generalmente importado pues en raras ocasiones los equipos más sofisticados se podían fabricar en España. Otro aspecto que debe destacarse es la importancia que tuvo en el CSIC la publicación de revistas, monografías y colecciones que servían para controlar la producción científica y dar visibilidad a la política científica del gobierno, pero que sirvieron para registrar con gran detalle todas las investigaciones realizadas en los institutos del CSIC.

Es en este contexto en el que se desarrolla la actividad del CSIC a lo largo de la década de 1940 y en el que se produce la adquisición e instalación del primer microscopio electrónico, en 1947, en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” (Barbero, 2024; 2025), gracias al interés y esfuerzo de investigadores como Luis Bru Villaseca (1909-1997) y José María Otero de Navascués (1907-1983) (Bru, 1936; Otero, 1944). Bru fue la primera persona que trabajó en España en el campo de la difracción de electrones, comenzando sus trabajos en 1931, en el Instituto Nacional de Física y Química de la JAE (Bru, 1981), poco después del descubrimiento del carácter ondulatorio de los electrones, demostrando que la ciencia española seguía muy de cerca las investigaciones que se hacían en el extranjero. En efecto, la comunidad científica española estuvo al tanto de los avances de la microscopía electrónica desde prácticamente su nacimiento. Conviene remarcar los artículos publicados en la revista Investigación

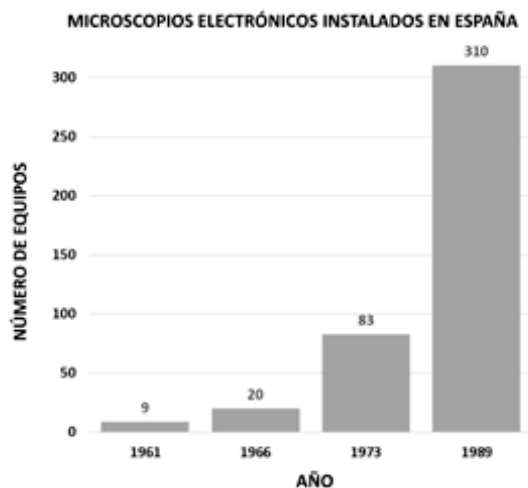
y Progreso firmados por el propio Ernst Ruska y sus colaboradores (Ruska, 1934; Ruska 1940) así como el publicado por Heinz O. Müller (Müller, 1940). Esta revista fue fundada en 1927 y estuvo dirigida hasta 1936 por el paleontólogo alemán Hugo Obermaier (1877-1946), figura destacada de la prehistoria y de la arqueología de nuestro país. También es interesante destacar cómo la prensa generalista se hizo eco de los sorprendentes avances de la microscopía electrónica, tal y como acreditan numerosas noticias aparecidas en periódicos españoles en las décadas de 1930 y 1940¹.

Un recorrido por cuatro décadas de microscopía electrónica en España

Una vez esbozados los aspectos más relevantes del contexto en el que se produce la irrupción de la microscopía electrónica en España, en este apartado realizaremos una descripción algo más detallada de la forma en la que la microscopía electrónica se fue difundiendo en las instituciones académicas españolas. Para ello se han revisado varios trabajos publicados por personas que, en algunos casos, tuvieron importantes responsabilidades en la Sociedad Española de Microscopía Electrónica (SEME) (Catalina, 1962; González Santander, 1965, 1966, 1998; González Santander y Martínez Cuadrado, 1973a, 1973b; Bru Villaseca, 1981, 1992; Aballe, 1989; Fernández-Galiano, 1992). Estos trabajos publicados entre 1962 y 1992 permiten reconstruir la expansión de la microscopía electrónica y conocer, en particular hasta la década de 1970, las personas que fueron responsables de los equipos que fueron instalándose en el país. Por otro lado, resulta sorprendente que desde finales de los años 1980 no se haya realizado un inventario pormenorizado de los equipos instalados en las diferentes universidades y centros de investigación españoles, lo que impide conocer cómo ha evolucionado el parque de microscopios electrónicos en los últimos 35 años.

¹ Muchas de estas reseñas se pueden encontrar en la Biblioteca Virtual de Prensa Histórica accesible en la web <https://prensahistorica.mcu.es/es/inicio/inicio.do>

El análisis de la implantación de la microscopía electrónica en España se ha realizado en cuatro años: 1962, 1966, 1973 y 1989, fechas de publicación de los artículos de Fernando Catalina (Catalina, 1962) Rafael González Santander (González Santander, 1966), del mismo González Santander junto con Gloria Martínez Cuadrado (González Santander y Martínez Cuadrado, 1973) y, por último, de Miguel Aballe (Aballe, 1989). En algunos casos existen ciertas inconsistencias entre los datos que aparecen en los artículos, pues en unas ocasiones se tiene en cuenta la fecha de adquisición mientras que en otras se ha considerado la de instalación. Por otro lado, los equipos adquiridos por algunas entidades privadas no se incluyen en todas las listas. Con estas limitaciones, la Fig. 1 da cuenta de la evolución del número total de microscopios electrónicos instalados en España en el periodo estudiado.



Es evidente que en el periodo 1946-1961 la instalación de equipos tuvo lugar a un ritmo lento (un equipo cada dos años, aproximadamente) como consecuencia de la escasa inversión que se hacía en ciencia en España. En el siguiente periodo (1962-1966), el ritmo de instalación de microscopios electrónicos aumenta a dos equipos por año. Esto se debe a la mejora de las circunstancias económicas y al inicio de la expansión de la comunidad científica que trabajaba en microscopía electrónica. En 1966, los 20 equipos que figuran en el inventario de microscopios electrónicos estaban ubicados en 5 provincias, aunque el 75% correspondía a Madrid, lugar donde se concentraban numerosos institutos y laboratorios adscritos a diferentes ministerios. Hasta esa fecha todos los equipos instalados eran microscopios electrónicos de transmisión (TEM, del inglés *Transmission Electron Microscope*) ya que los de barrido (SEM, del inglés *Scanning Electron Microscope*) se habían comenzado a comercializar en 1965. Los fabricantes con más representación eran Philips, Siemens y RCA.

Fig. 1

Número total de microscopios electrónicos instalados en España según inventarios realizados en los años 1961, 1966, 1973 y 1989.

En el censo efectuado en 1973 se observa que el ritmo de equipos instalados en el periodo 1966-1973 asciende a unos 9 por año. Este incremento tiene su origen en la puesta en marcha, en 1964, del Fondo Nacional para el Desarrollo de la Investigación Científica dentro del primer Plan de Desarrollo creado para impulsar la economía (Sanz Menéndez, 1996). Este fondo permitió que las universidades accediesen directamente a financiación de la investigación sin tener que pasar por el control del CSIC, como había ocurrido con anterioridad. Este hecho facilitó la descentralización de la ciencia en general y de la microscopía electrónica en particular. De esta forma, en 1973 los equipos instalados en Madrid suponían el 50% del total mientras que la otra mitad se distribuían en servicios de microscopía electrónica ubicados en facultades universitarias y escuelas de ingeniería de 17 provincias. En este inventario ya se detecta la presencia de 7 equipos SEM (el 9% del total). En cuanto a las empresas fabricantes, Philips y JEOL ocupaban las primeras posiciones por número de equipos instalados. Empresas como Siemens y RCA fueron perdiendo su peso entre los fabricantes de microscopios electrónicos, y ambas abandonaron el mercado a finales de la década de 1960 (Alché y Serena, 2025).

En la lista de 83 equipos que habían sido instalados en nuestro país hasta 1973 tan solo 4 (un 5%) tenían a una mujer como persona responsable. Estas mujeres pioneras en el uso de la microscopía electrónica en

nuestro país fueron: Dña. María Asunción Sáenz de Cenzano, quien ya en 1956 estaba a cargo de un equipo RCA en la empresa Etino-Química S.A. de Monzón (Huesca); la Dra. María del Carmen Risueño, que fue responsable de dos equipos (Philips y JEOL) instalados en el Patronato Ramón y Cajal del CSIC en 1969 y 1971; y la Dra. Julia María González Peña que se encargaba de un equipo Siemens instalado en 1972 en el Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV) del CSIC.

En el último año analizado (1989) el parque de equipos instalados ascendía a 310, indicando que la instalación de microscopios electrónicos se había incrementado hasta los 14 equipos/año en el periodo 1973-1989. Con la llegada del régimen democrático se produce un replanteamiento de la política científica y un considerable aumento de las inversiones con el fin de converger con los países europeos más desarrollados. Un reflejo de este esfuerzo queda plasmado en el aumento de la inversión en ciencia. En 1970 en España se invertía el 0,2% del Producto Interior Bruto (PIB) en investigación y desarrollo, cifra que alcanzó un 0,8-0,9% en 1990 (Sanz Menéndez, 1996). Además, la consolidación de las comunidades autónomas, con competencias en investigación científica-tecnológica, junto con la publicación de leyes que impulsaron la autonomía universitaria fueron claves para incentivar la descentralización del parque de microscopios electrónicos instalados. En 1989, el porcentaje de equipos instalados en Madrid había descendido hasta el 38% y ya eran

32 las provincias españolas que contaban con estos instrumentos. En cuanto al tipo de equipos que figuraban como operativos en este último periodo, se constata que casi el 40% ya eran SEM, lo que pone de manifiesto la penetración que tuvo esta técnica microscópica.

Conviene señalar aquí que muchos de los microscopios electrónicos prestaron servicio en unas condiciones no siempre favorables pues la escasa financiación impedía la adquisición de componentes de repuesto o la contratación de los necesarios servicios de mantenimiento, prestados por empresas extranjeras o por empresas intermediarias instaladas en España. Otro problema endogámico del sistema, que aún se sigue padeciendo, era la falta de personal técnico que permitiese aumentar la utilización de los equipos, mejorando la eficiencia de las inversiones realizadas. En cualquier caso, a pesar de que el ecosistema científico español no estaba tan evolucionado como el de grandes potencias científicas mundiales, la comunidad dedicada a la microscopía electrónica fue capaz de seguir el ritmo de las investigaciones realizadas en el exterior.

Los equipos de la exposición: protagonistas y hazañas

La exposición “Gigantes para ver lo diminuto. Microscopía electrónica” exhibe un conjunto de piezas procedentes del fondo de instrumentos científicos del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (MUNCYT). Todos estos microscopios fueron instalados en diferentes instituciones de nuestro país durante el periodo de tiempo abarcado por los artículos referenciados anteriormente. En concreto, se cuenta con un equipo del periodo 1946-1961, dos del periodo 1962-1966, otro del periodo 1967-1973, y cinco del periodo 1974-1989. De este último periodo también se exhibe el primer microscopio de efecto túnel (STM, del inglés *Scanning Tunneling Microscope*) instalado en nuestro país.

A continuación, se va a realizar una breve reseña de los equipos que componen la exposición, de algunas de las personas que trabajaron con los mismos, de sus áreas de investigación y de sus logros más significativos. Las imágenes de los diferentes microscopios electrónicos se pueden encontrar en la parte del catálogo dedicada a las piezas que se exhiben en la exposición. El título de cada uno de los siguientes subapartados indica el tipo de microscopio (TEM, SEM o STM), la empresa fabricante, el modelo y el año de adquisición o instalación.

TEM Radio Corporation of America (RCA) - EMU-2A (1946)

Aunque en otros trabajos (Barbero, 2024; 2025) se proporcionan muchos detalles sobre esta pieza histórica, aquí se desea enfatizar que este equipo –seguramente el más importante de la exposición– supuso una considerable inversión económica, pero tuvo un gran impacto en la ciencia del momento tal y como el propio régimen franquista se encargó de publicitar². Este equipo y sus primeros usuarios fueron la semilla de toda una escuela de microscopía electrónica que surgió en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC, en un periodo en el que hacer ciencia era algo heroico visto desde nuestra actual perspectiva. Este microscopio se utilizó para realizar observaciones sobre cientos de muestras de gran variedad, aportadas por investigadores de distintos campos que deseaban contemplar con sus propios ojos las maravillas que este equipo ofrecía gracias a su poder de resolución de unos 10 nm y sus 20 000 aumentos. Muchas de estas observaciones han quedado recogidas en numerosos artículos publicados en revistas y monografías editadas por los diferentes institutos del CSIC.

² Portada del diario ABC de Madrid fechada el 1 de febrero de 1948 en la que aparece el propio General Franco junto al equipo. El NO-DO también difundió un reportaje emitido en 1948, accesible en <https://www.rtve.es/play/videos/nodo/not-267/1465447/> (desde el minuto 2:46 al 4:32).

La exposición incluye una breve entrevista³ realizada al Dr. José Antonio Aznárez Candao, Profesor de Investigación del CSIC, ya jubilado, que fue la última persona que trabajó con este instrumento junto con el Dr. Fernando Catalina Perea, otro de los personajes claves de la microscopía electrónica de nuestro país (Barbero, 2024; 2025).

TEM Technika Slaboproudová (TESLA) - BS 242A (1962)

Este equipo es una de las rarezas de esta exposición, no tanto por las especificaciones y el uso del equipo sino porque fue adquirido a la factoría Tesla ubicada en Brno (antigua República Socialista de Checoslovaquia), en un momento en el que las relaciones de España con los países de la órbita de la antigua Unión Soviética (URSS) eran prácticamente inexistentes. Este instrumento (con un poder de resolución de 3,5 nm y 30 000 aumentos) se instaló en el Hospital de la Concepción (Fundación Jiménez Díaz) gracias a la intermediación de un ingeniero procedente de dicho país. Con este equipo se realizaron en España las primeras observaciones de la estructura interna de

³ Las entrevistas a los diferentes protagonistas vinculados a cada equipo forman parte de la exposición virtual que se puede recorrer en <https://muncyt.peragallo.es/alcobendas.html>

las células junto con importantes investigaciones en anatomía patológica, especialmente en el ámbito de la nefrología⁴. La persona que lideró estos trabajos fue el Dr. Horacio Oliva Aldámiz⁵ quien escribió innumerables artículos y libros, de los que se debe

destacar la primera monografía publicada en España sobre la ultraestructura celular (Oliva, 1964). La Fig. 2, obtenida por este microscopio, muestra una imagen de una célula con diversos orgánulos.

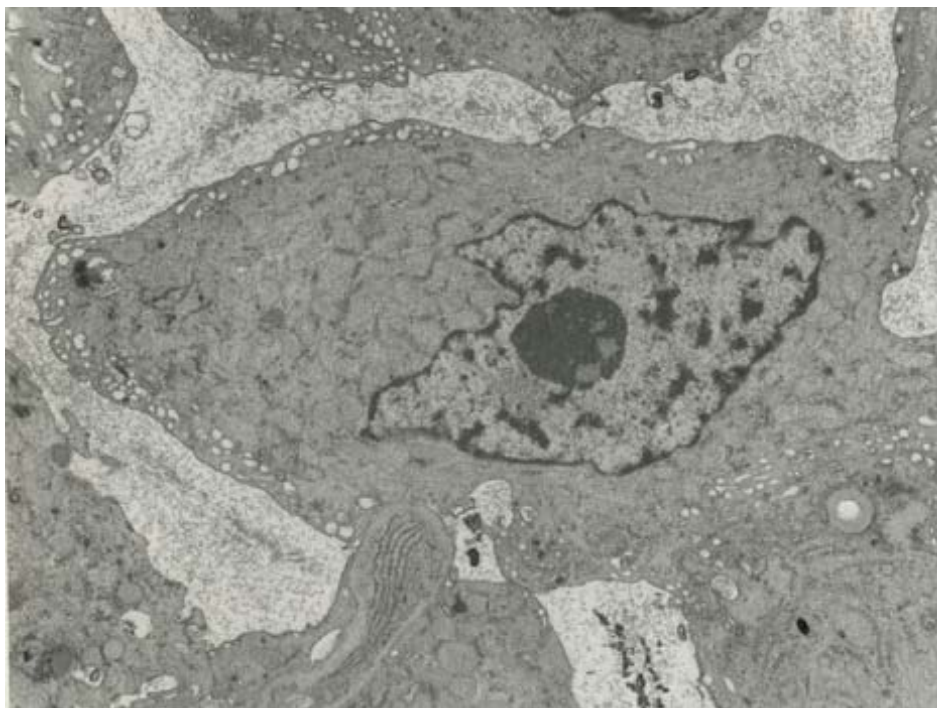


Fig. 2

Imagen de 12500 aumentos, obtenida en 1979, de una célula con núcleo, nucléolo, retículo endoplásmico y vesículas de pinocitosis periféricas. Se puede apreciar la matriz intercelular entre varias células. Imagen cortesía del Dr. Federico Rojo Todo y descripción proporcionada por el Dr. José Fortes Alén (ambos pertenecientes a la Fundación Jiménez Díaz - Grupo Quirónsalud).

⁴ Más información sobre este equipo se puede encontrar en la base de datos de la Red Digital de Colecciones de Museos de España (CERES) del Ministerio de Cultura accesible en <https://ceres.mcu.es/pages/SimpleSearchCE1992/024/0001>.

⁵ Una entrevista al Dr. Horacio Oliva Aldámiz se puede encontrar en un documental de la serie "Piezas con Memoria" del MUNCYT al que se puede acceder en el enlace https://www.youtube.com/watch?v=HLtDTK5k_iE.

TEM Siemens & Halske - ELMISKOP 1A (1964)

Finalizada la Segunda Guerra Mundial, Ernst Ruska reinició, dentro de la compañía Siemens, sus trabajos de diseño y montaje de microscopios electrónicos (Alché y Serena, 2025). Como fruto de este trabajo en 1954, esta compañía sacó a la venta el mítico modelo Elmiskop 1. Pocos años después comercializaría la variante Elmiskop 1A. Siemens llegó a instalar unos 1200 equipos en todo el mundo de ambos modelos. Uno de ellos llegó al Instituto de Óptica “Daza de Valdés” en 1964, para sustituir el equipo RCA EMU-2A que se había quedado anticuado tras haber prestado un gran servicio a la ciencia española.

El equipo Elmiskop 1A operaba con voltajes aceleradores 40-100 kV, logrando una amplificación de unos 200 000 aumentos, con una impresionante resolución de unos 0,5 nm. Este TEM usaba lentes dobles para la etapa de condensación del haz de electrones lo que permitía controlar muy bien la iluminación de la muestra, minimizando el daño causado por el haz de electrones, por lo que resultaba adecuado para el estudio de muestras biológicas. El equipo incluía otras mejoras como el sistema de difracción de electrones o la capacidad para registrar un gran número de imágenes en cada sesión. La Fig. 3 muestra un patrón de difracción (o microdifracción) de un cristal de MoO_3 obtenido con este equipo. Mediante estos patrones se puede

determinar si la muestra es un sistema desordenado o si sus átomos forman una estructura periódica y a qué sistema cristalográfico pertenece (cúbico, hexagonal, trigonal, etc.).

El Dr. Aznárez, que llegó a trabajar con el RCA EMU-2A como se ha mencionado anteriormente, fue una de las primeras personas que utilizó el Elmiskop 1A en el Instituto de Óptica, llegando a ser el responsable de 1972 a 1995 del Servicio de Microscopía Electrónica en dicho centro. Durante buena parte de ese periodo, el Dr. Aznárez utilizó el equipo Elmiskop 1A para caracterizar materiales de interés para las diferentes líneas de investigación del propio instituto, destacando entre ellos, los materiales relacionados con las películas fotográficas así como los empleados en diferentes sistemas de detección de luz y de otras radiaciones electromagnéticas.



Fig. 3

Imagen de microdifracción de un cristal de MoO_3 obtenida el 3 de mayo de 1967 usando el equipo Elmiskop 1A del Instituto de Óptica del CSIC. Cortesía del Dr. José Antonio Aznárez Candao.

TEM Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) - JEM 200A (1972)

Este equipo fue adquirido por la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y se instaló en el Laboratorio de Física de Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas de dicha universidad. Operaba con 200 kV de potencial acelerador y se obtenían imágenes con 200 000 aumentos y resoluciones cercanas al medio nanómetro. Este microscopio fue utilizado por numerosos investigadores, destacando entre ellos la figura clave de Luis Bru Villaseca del que se ha hablado en el anterior artículo curatorial (Barbero, 2025). Este equipo se utilizó en la investigación de las propiedades físicas

(mecánicas, electrónicas, ópticas, magnéticas, etc.) de numerosos materiales con el fin de entender la relación existente entre su estructura a escala nanométrica y dichas propiedades. Este instrumento se utilizó también para investigar la fatiga de materiales, con el fin de entender cómo se originan y propagan las microgrietas a través de materiales sometidos a deformaciones, elevadas temperaturas o grandes gradientes térmicos. Uno de los discípulos de Luis Bru, el Dr. Javier Piqueras, Catedrático emérito de la UCM, es la persona que aparece en el audiovisual que se muestra en la exposición y cuya imagen también aparece en la Fig. 4 manejando el equipo JEOL JEM 200A.

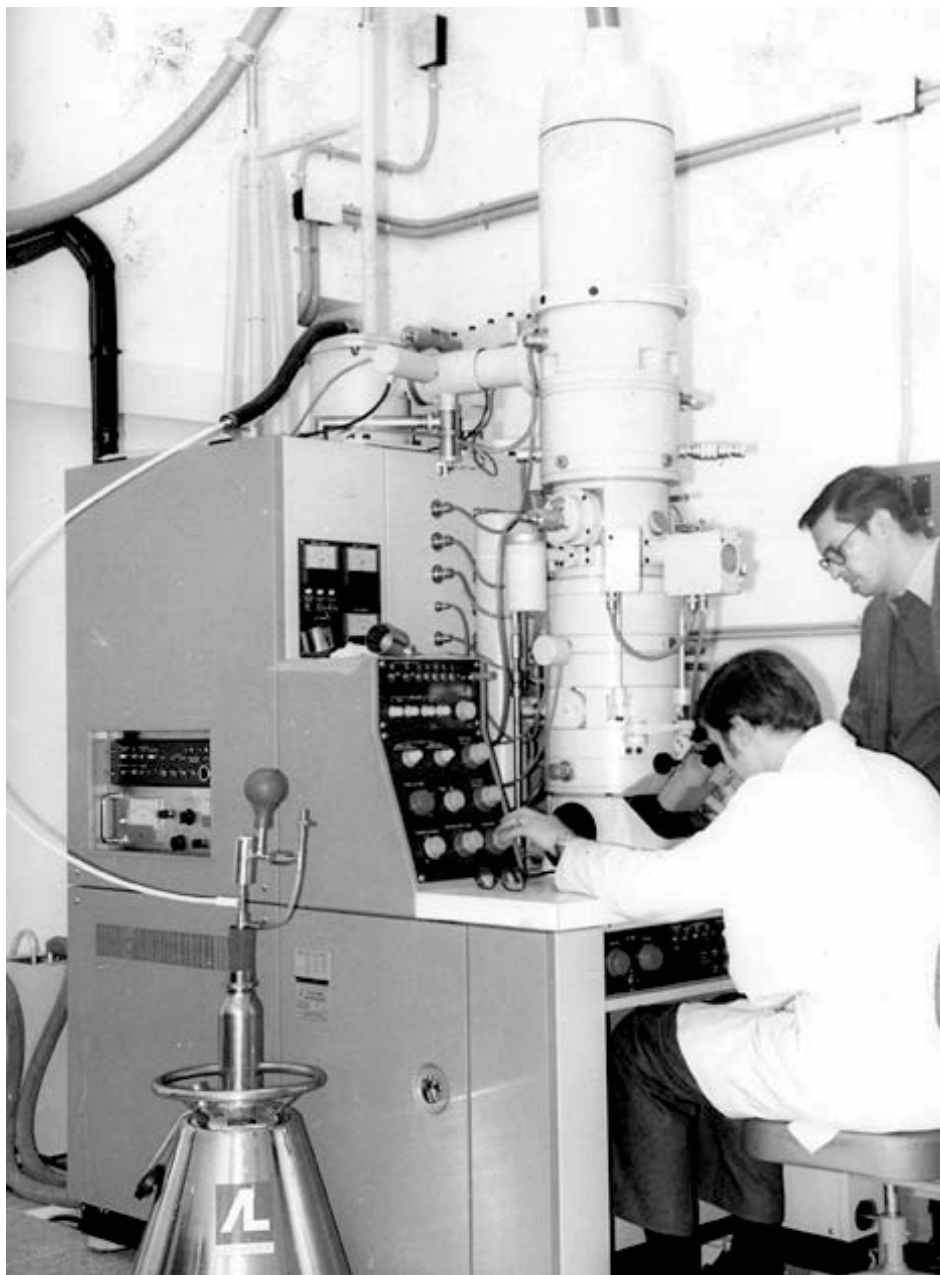


Fig. 4

El Dr. Javier Piqueras (sentado) y el Dr. José Serna, junto al JEOL JEM 200A en la Facultad de Física de la Universidad Complutense de Madrid. Cortesía del Prof. Javier Piqueras.

TEM Hitachi Ltd. - HU 12A (1974)

Este equipo fue instalado en 1974 en el Departamento de Anatomía Patológica del Hospital 12 de Octubre de Madrid. Se debe mencionar que otro equipo idéntico se ubicó en el Hospital de la Concepción (Fundación Jiménez Díaz), sustituyendo al microscopio Tesla que también forma parte de esta exposición y que ha sido descrito anteriormente. Este equipo operaba a 125 kV, consiguiendo imágenes con 500000 aumentos y resoluciones cercanas a los 0,2 nm. Se utilizó para realizar investigaciones en biomedicina, caracterizando las estructuras internas de células sanas o que estuviesen afectadas por algunas patologías, con el fin de comprender cómo se desencadenan y actúan las enfermedades, conocer la morfología de las partes dañadas por una enfermedad, y determinar los efectos de los tratamientos médicos. Este microscopio intervino en más de 25000 estudios clínicos de pacientes a lo largo de sus 25 años de funcionamiento.

La persona que tuvo mayor vinculación con este equipo durante su periodo operativo fue el Dr. Miguel Ángel Martínez González, médico adjunto y jefe de la sección de Anatomía Patológica del Hospital Universitario 12 de Octubre. El Dr. Martínez ha sido entrevistado con ocasión de esta exposición, quedando su testimonio reflejado en el documento audiovisual que se muestra junto al equipo. En la Fig. 5 se presenta una de las imágenes obtenidas con el equipo Hitachi HU 12A.

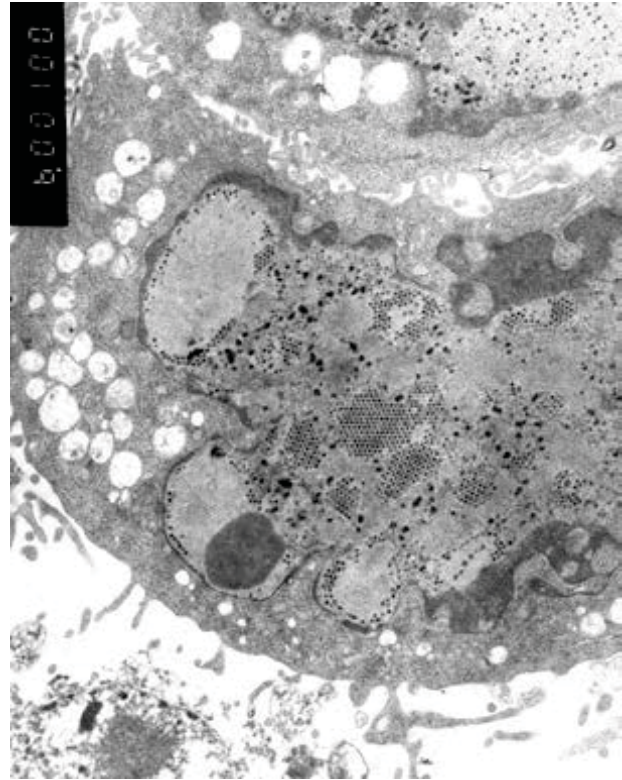


Fig. 5

Imagen de una célula cuyo núcleo está infectado por adenovirus (inclusiones hexagonales). La imagen fue tomada con el microscopio Hitachi HU 12A en 1984 en el Servicio de Anatomía Patológica del Hospital 12 de Octubre de Madrid. Cortesía del Dr. Miguel Ángel Martínez González y de la Dra. Marina Alonso (Hospital 12 de Octubre de Madrid).

SEM International Scientific Instruments (ISI) - SMS-2 (1974)

La estrategia de realizar barridos con el haz de electrones para obtener información de la superficie de muestra data de la década de los años 1930, pero no es hasta 1965 cuando se comercializa el primer SEM por la empresa Cambridge Instruments. El uso de los equipos de tipo SEM se extendió rápidamente, teniendo fuerte impacto en campos como la biología o la ciencia de materiales.

Este equipo ISI SMS-2, es el primero de los tres SEM que se muestran en la exposición. Fue instalado en 1974 en el Real Jardín Botánico (RJB) del CSIC y alcanzaba una resolución nominal de unos 7 nm y un aumento de 160000X. Este equipo se utilizó en numerosos estudios botánicos, permitiendo caracterizar diferentes partes de las plantas, como tricomas o granos de polen, así como la morfología de sus cromosomas. Estos estudios son de importancia para la identificación de los caracteres externos de las plantas con el fin de facilitar su clasificación taxonómica. Esta información es esencial para conocer el patrimonio natural de una región, así como su evolución debido a causas naturales o por efecto de la acción humana. Un ejemplo de las imágenes adquiridas con este equipo se muestra en la Fig. 6.



Fig. 6

Imagen de granos de polen de jara lanuda (*Halimium lasianthum* subsp. *lasianthum* (Lam.) Spach) tomada por el equipo ISI SMS-2. Cortesía de la Dra. Josefa Jiménez Albarrán.

Apoyando la presentación del equipo, en la exposición se muestra un audiovisual con una entrevista a la Dra. Josefa Jiménez Albarrán, conservadora del MUNCYT (1986-2017), quien utilizó este SEM para realizar su tesis doctoral en la Universidad Complutense de Madrid. Es importante señalar que, durante muchos años, la persona que conoció con profundidad y manejó el equipo fue D. Miguel Jerez, técnico del RJB. Gracias a su trabajo, otros investigadores como la Dra. Concepción Sáenz Laín (experta en polen) o el Dr. Francisco de Diego Calonge (experto en hongos) pudieron llevar a cabo importantes investigaciones. Es interesante señalar que muchos artículos que muestran imágenes obtenidas con este equipo se publicaron en la revista *Anales del Jardín Botánico* de Madrid, fundada en 1941.

SEM Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) JSM-35C (1978)

Este equipo, fabricado por la empresa japonesa JEOL, fue instalado en 1978 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Este SEM podía alcanzar una resolución de unos 10 nm y ampliar las imágenes unas 180 000 veces. Además, contaba con ciertas mejoras técnicas con relación a sus predecesores, como el enfoque automático, la corrección de astigmatismo o los

sistemas antivibración, lo que permitía su uso tanto para trabajos rutinarios de control de calidad como para realizar investigaciones avanzadas.

La persona entrevistada que aparece en el audiovisual vinculado al equipo en la exposición es el Dr. José Ygnacio Pastor, Catedrático de Ciencia e Ingeniería de Materiales actualmente en activo de la UPM, quien fue la última persona que trabajó con el mismo y se encargó de preservarlo en buen estado hasta que fue cedido al MUNCYT. Este equipo ha servido para realizar numerosos estudios sobre materiales metálicos (aceros y aluminio) y cerámicos, orientados a la determinación de la relación entre la estructura microscópica y las propiedades mecánicas del material. Además, este microscopio se utilizó para estudiar la evolución de la microestructura cuando piezas fabricadas con un material son sometidas a determinados esfuerzos o condiciones ambientales extremas, lo que permite estudiar su posible fallo. La Fig. 7 muestra una imagen obtenida con el equipo JEOL – JSM-35C de un material cerámico-metálico tras sufrir una fractura.

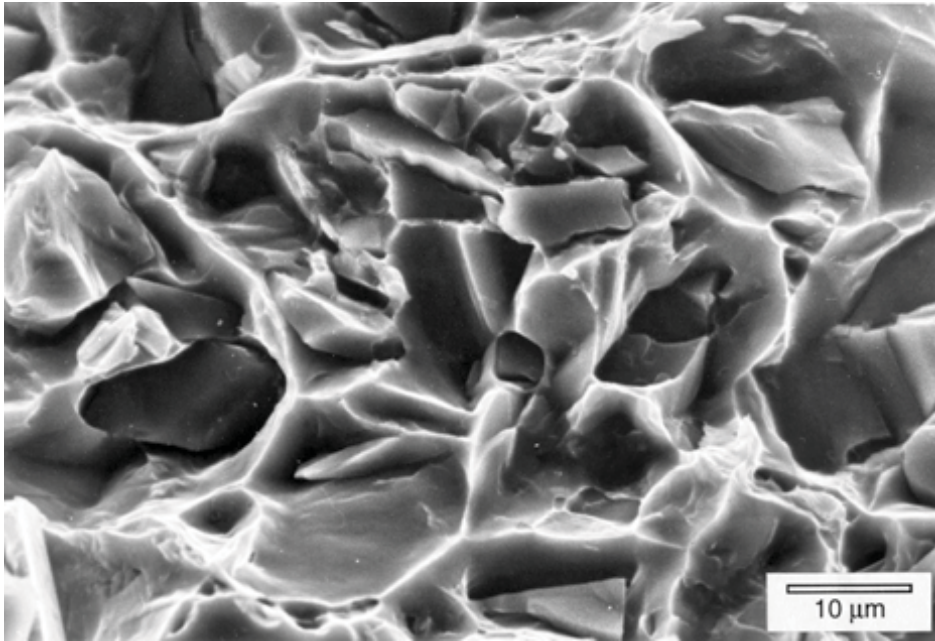


Fig. 7

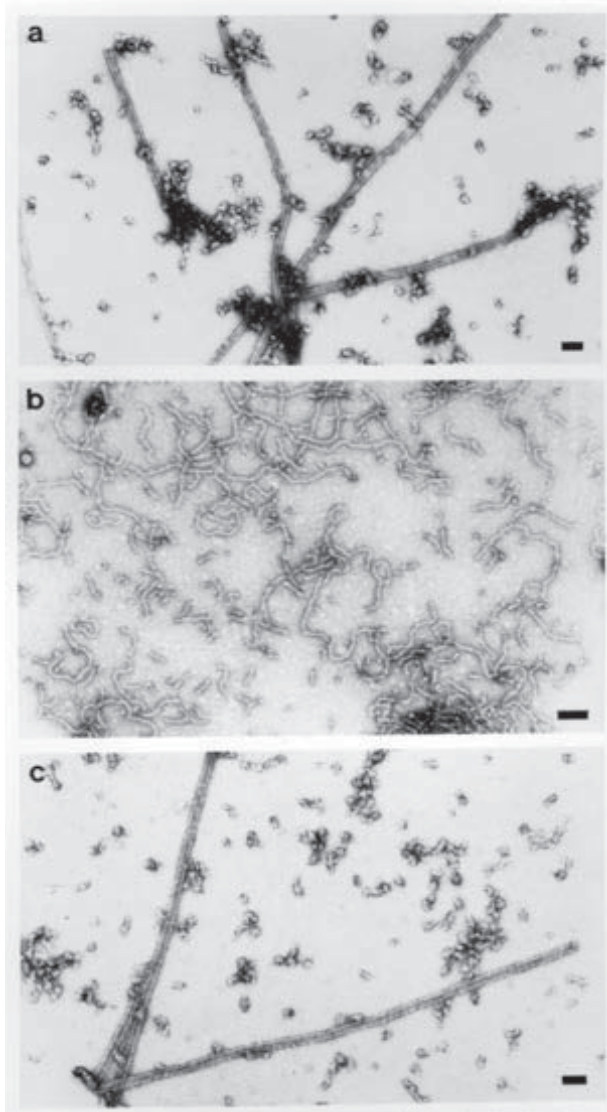
Imagen obtenida por el SEM JEOL - JSM-35C de la UPM mostrando una superficie de un material metal-cerámico tras sufrir un proceso de fractura. Cortesía del Dr. José Ygnacio Pastor, Catedrático de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la UPM.

TEM Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) JEM 100B (1978)

Este TEM fue instalado aproximadamente en 1978 en el Centro de Biología Molecular "Severo Ochoa" (CBM). Usaba un potencial acelerador de hasta 100 kV, alcanzando una resolución de 0,2 nm y proporcionando unos 500 000 aumentos de las imágenes. Este equipo se utilizó con éxito para estudiar diferentes virus y células, así como

orgánulos celulares. El estudio de las estructuras subcelulares permite conocer cómo funciona la maquinaria celular, detectar posibles fallos en dichas estructuras o en su funcionamiento, entender las enfermedades ligadas a estos fallos, y explorar posibles tratamientos de las mismas.

Durante muchos años la persona responsable de este equipo fue el Dr. José López Carrascosa, Profesor de Investigación del CSIC, ya jubilado, y antiguo jefe del Departamento de Macromoléculas



del Centro Nacional de Biotecnología (CNB), centro al que se trasladó tras su etapa en el CBM. El Dr. López Carrascosa aparece en el pequeño documental grabado que se exhibe junto al equipo. Entre sus hallazgos figuran la descripción en 3D, por vez primera, de un motor molecular o sus estudios sobre chaperonas moleculares. Con este equipo se estudiaron diversos tipos de bacteriófagos en diferentes momentos de su desarrollo (aislados, en el exterior de una célula, en la superficie celular, introduciendo su material genético en la célula, etc.). También se caracterizaron numerosas estructuras proteicas. Un ejemplo de estas investigaciones se muestra en la Fig. 8, que ilustra la acción de una endotoxina sobre el proceso de ensamblaje de los microtúbulos (estructuras celulares con forma cilíndrica que intervienen en diversos procesos celulares).

Fig. 8

Microtúbulos ensamblados *in vitro* en presencia de una endotoxina bacteriana (lipopolisacárido o LPS). Los microtúbulos fueron procesados mediante tinción negativa con acetato de uranilo. La imagen (a) corresponde a los microtúbulos control (sin exposición a la endotoxina), mientras que las imágenes (b) y (c) corresponden a microtúbulos incubados con endotoxina con una relación tubulina/LPS 10 y 100, respectivamente. La barra de escala mide 100 nm. Imagen obtenida en octubre de 1989 por la Dra. Cristina Risco Ortiz y facilitada por el Dr. José López Carrascosa.

SEM International Scientific Instruments, Inc. (ISI) & KeveX Corp. - ISI SS-60 (1981)

Este es el tercer SEM que se exhibe en la exposición. Se trata de un modelo ISI SS-60 fabricado por las empresas International Scientific Instruments y KeveX. Fue instalado en 1981 en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (ETSIAE) de la UPM. Este equipo fue el primer SEM de dicha Escuela lo que permitió dar un salto cualitativo en las investigaciones realizadas en ella, al lograr alcanzar una resolución de unos 4 nm y 200 000 aumentos. Con este SEM se estudiaron materiales de uso en aeronáutica como metales, aleaciones metálicas de Al, Mg y Ti, y superaleaciones capaces de resistir altas temperaturas. Este equipo también analizó fallos en piezas fabricadas con diferentes materiales cuando son sometidas a grandes esfuerzos, deformaciones o altas temperaturas.

En la exposición también se muestra un audiovisual con una entrevista al Dr. José María Badía Pérez, Catedrático emérito de la UPM. El Dr. Badía estuvo a cargo de un SEM JEOL instalado en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en 1976. En el INTA tuvo como mentor al Dr. José María Pintado, uno de los mayores expertos en fallos de materiales a nivel internacional. En 1982, consiguió un puesto en la ETSIAE donde comenzó a manejar el SEM ISI SS-60, en líneas de investigación similares a

las desarrolladas en el INTA. El Dr. Badía, junto con otras personas como el Dr. Miguel Aballe Carride y la Dra. Paloma Adeva Ramos, investigadores del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) del CSIC, organizaron reuniones, escuelas y cursos para potenciar el uso de la microscopía electrónica de barrido en España. Como fruto de toda esta actividad se publicó, tras diez años de esfuerzo, uno de los libros de referencia sobre esta técnica en España e Iberoamérica (Aballe et al., 2000).

STM Laboratorios de IBM en Rüschlikon, Zürich (Suiza) - Prototipo (1984)

Esta es otra de las grandes piezas de la exposición. Se trata de un microscopio de efecto túnel (STM) fabricado en los laboratorios que la empresa norteamericana IBM tiene en la pequeña localidad de Rüschlikon, cerca de Zürich (Suiza). Este equipo se diseñó y ensambló por los Dres. Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, inventores de esta técnica, que fue reconocida con el Premio Nobel de Física de 1986, compartido con E. Ruska, co-inventor del microscopio electrónico. En el diseño y montaje de este equipo también intervino de manera decisiva el técnico Christoph Gerber.

El equipo se trasladó en 1984 desde Suiza para ser instalado en el Departamento de Física Fundamental de la Facultad de Ciencias de la Universidad

Autónoma de Madrid (UAM). Este hecho convirtió a nuestro país en uno de los primeros en poder usar esta asombrosa técnica, con la que se alcanza resolución atómica de manera habitual. La llegada a Madrid de este equipo fue una rocambolesca aventura en la que intervinieron los profesores Nicolás García García y Arturo María Baró Vidal de la UAM (Asenjo, 2022) y de la que se han hecho interesantes documentales^{6 7}.

Este instrumento, poco después de su instalación en Madrid, sirvió para realizar la primera observación del virus de tipo bacteriófago $\phi 29$ con resolución atómica (Baró et al., 1985) lo que fue toda una hazaña en su momento, sobre todo si se tiene en cuenta la rudimentaria manera de representar los diferentes barridos que hacía la punta del STM sobre la muestra (ver un ejemplo en la Fig. 9).

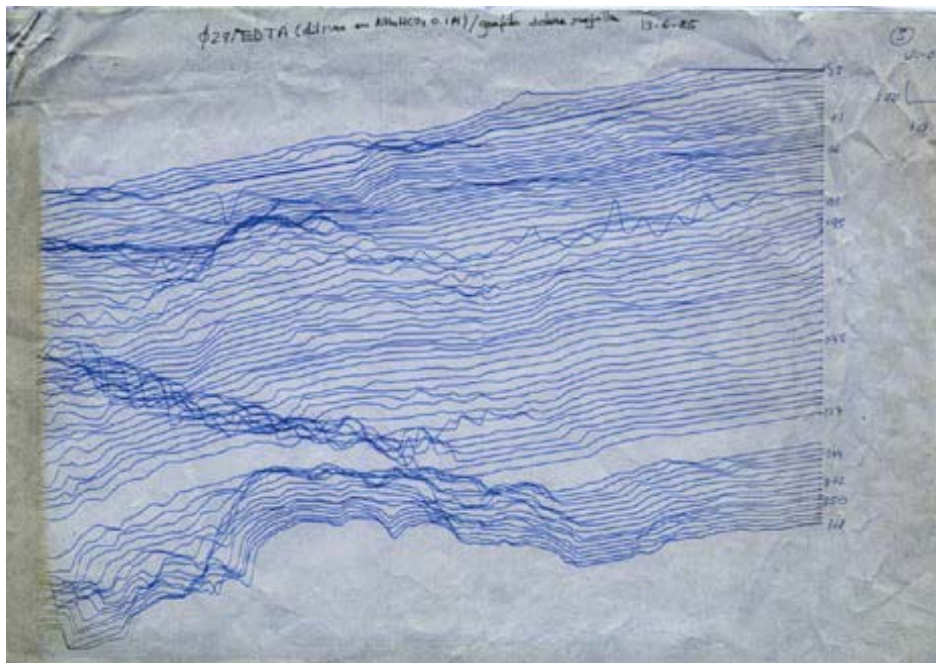


Fig. 9

Imagen de la topología del bacteriófago $\phi 29$ obtenida con el equipo STM de la UAM el 13 de junio de 1985. Cortesía del Dr. Arturo María Baró.

⁶ Documental “Piezas con Memoria: Microscopio de efecto túnel”. Canal FECYT Ciencia en YouTube. Accesible en <https://www.youtube.com/watch?v=3QYiF-LaOpE>.

⁷ Documental “40 años viendo átomos”. Canal CSIC Divulga en YouTube. Accesible en <https://www.youtube.com/watch?v=pJ0MtKqTOco>

El equipo STM mostrado en la exposición se complementa con el testimonio del Dr. Julio Gómez Herrero, Catedrático del Departamento de Física de la Materia Condensada de la UAM. El Dr. Gómez Herrero fue testigo de la llegada de este equipo a la UAM y conoció de primera mano el entusiasmo que generó entre la comunidad científica española el tener acceso a este sofisticado instrumento. Este entusiasmo dio lugar a una escuela española de gran nivel internacional dedicada primero al diseño y uso del STM, y posteriormente a desarrollar las técnicas derivadas del STM que ahora se engloban bajo las siglas SPM (del inglés, *Scanning Probe Microscopy*).

Historia reciente de la microscopía electrónica en España

A finales de la década de 1980 había más de 300 microscopios instalados en España, no todos con el mismo nivel de utilización, que formaban una extensa red de servicios de microscopía, gestionados por universidades y centros de investigación, y en los que una gran cantidad de personal científico y técnico desarrollaba su actividad. Muchas de estas personas formaban parte de la Sociedad Española de Microscopía Electrónica (SEME) cuyo inicio se ha descrito en el anterior artículo curatorial (Barbero, 2025). Desde 1984, momento al que pertenece el equipo más moderno mostrado en la exposición, hasta hoy han transcurrido cuatro décadas marcadas por el vertiginoso desarrollo exponencial del conocimiento científico-tecnológico, que también han experimentado las técnicas microscópicas como se ha esbozado en el primer artículo curatorial de este catálogo.

Se puede decir que, en general, esta rápida evolución de la microscopía electrónica, en sus diversas variantes, ha sido seguida de cerca por la comunidad científica española, no sin un esfuerzo notable, porque nuestro país se sigue caracterizando por una inversión en ciencia inferior a la media de los países más desarrollados, a la vez que posee un sistema de planificación y gestión de los recursos que es manifiestamente mejorable.

En este apartado se va a describir a grandes rasgos el desarrollo de la microscopía electrónica española en los últimos cuarenta años. Por un lado se hará un breve repaso a la evolución de la SEME y, por otro, se describirá la creación de grandes servicios e infraestructuras de carácter colaborativo que han permitido seguir las tendencias mundiales que han ido dándose en el campo de la microscopía electrónica.

De la Sociedad Española de Microscopía Electrónica a la Sociedad de Microscopía de España

Desde su fundación en 1956, y su reconocimiento internacional en 1958 (Barbero, 2025), la SEME fue activa en la organización de reuniones, cursos y conferencias. La actividad de la SEME hasta finales del siglo pasado está documentada en diferentes estudios (Catalina, 1962; González Santander, 1966; González Santander y Martínez Cuadrado, 1973a; Bru Villaseca, 1981, 1992; Aballe, 1989; Hawkes, 2003).

Entre 1956 y 1960 los miembros de la SEME mantuvieron reuniones internas relacionadas con la organización y puesta en marcha de la misma, su conexión con los foros internacionales, etc. A partir de 1960 tienen lugar encuentros de marcado carácter científico, que se celebran cada dos años, en las que prima el intercambio de conocimiento. Estas reuniones se celebraron inicialmente en Madrid, pero luego fueron organizadas en diferentes lugares de la geografía española.



Fig. 10

Carta del Dr. Hugh Y. Elder, presidente de la Royal Microscopical Society (entidad organizadora del IX EUREM celebrado en York, Reino Unido) al Prof. Antonio Ríos, organizador del X EUREM en Granada, felicitándolo por dicha celebración.

Se debe destacar el hito que supuso para la SEME la celebración, en 1992, del X Congreso Europeo de Microscopía Electrónica (EUREM X) en Granada. Este evento reunió a más de 1400 personas de 48 países, donde destacaban las delegaciones procedentes de Alemania, Francia, Reino Unido e Italia, además de la española. Se puede decir que, tras este exitoso congreso, acreditado por la carta mostrada en la Fig. 10, el proceso de internacionalización de la microscopía electrónica española se había consolidado.

A partir de 1998 la SEME comenzó a publicar un boletín con artículos y noticias de interés a la vez que aumento su actividad en la organización de cursos, certámenes de imágenes, etc. Otro hecho destacable que tuvo lugar en 1999 fue el cambio de nombre de la SEME, pasando a denominarse Sociedad de Microscopía de España (SME)⁸, lo que permitió incorporar en una misma sociedad a la potente comunidad científica procedente de las microscopías de tipo SPM que había surgido en España a mediados de los 1980, así como converger con la creciente comunidad de usuarios de microscopías fotónicas avanzadas, absolutamente complementarias, y en muchos casos, capaces de alcanzar resoluciones subcelulares gracias a sus últimos avances.

⁸ La información sobre la organización y actividad de la Sociedad de Microscopía de España se encuentra en su página web <https://www.microscopia.org>



Fig. 11

Cartel del Acto Conmemorativo del 50 aniversario de la Sociedad de Microscopía de España.

En 2006 tuvo lugar, en la sede de la organización central del CSIC, el evento conmemorativo de los 50 años de la creación de la SME, que contó con la participación de numerosos miembros de la Sociedad, y donde se impartieron sendas conferencias en las áreas de las ciencias de la vida y de los materiales, respectivamente. La primera de estas conferencias fue impartida por el Prof. Richard Henderson, del Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology (MRC LMB) en Cambridge, U.K., quien poco después (en 2017) recibió el Premio Nobel de Química “por desarrollar la criomicroscopía electrónica para la determinación estructural en alta resolución de biomoléculas en soluciones”. La conferencia también contó con la presentación de un breve glosario histórico por parte de la Dra. Inmaculada Herrera Calvet, presidenta de la SEME entre 1980-1994. La Fig. 11 muestra el cartel con el anuncio de este importante evento.

El Prof. Henderson, así como otros notables investigadores en microscopía como, por ejemplo, el Prof. Joachim Frank de la University of Columbia (New York, EE.UU.) cogalardonado igualmente con el premio Nobel de Química en 2017, han participado de forma asidua en actividades de la SME, colaborando especialmente con grupos como el servicio de criomicroscopía del CNB-CSIC del que se hablará más adelante.

En la actualidad la SME está integrada por 207 miembros numerarios, 30 miembros corporativos

y 6 miembros honoríficos. Los socios de la SME están constituidos por personal investigador, personal técnico, responsables de compañías, y profesionales diversos de instituciones públicas (institutos, universidades) y privadas, interesados en el desarrollo y el conocimiento de la microscopía en todos sus aspectos. Como muestra la Fig. 12, la composición de género entre los miembros numerarios se encuentra relativamente equilibrada habiéndose experimentado un cambio notable en este aspecto a lo largo de los últimos 50 años. En cuanto a la temática de investigación, se observa una proporción similar de miembros dedicados a las ciencias de la vida y las ciencias de materiales. En cuanto a la distribución geográfica de los miembros se encuentra representada un buen número de Comunidades Autónomas (e incluso hay miembros extranjeros) aunque se observa una mayor presencia de las grandes capitales que aglutinan la mayor parte de los equipos, institutos, universidades y servicios centralizados de microscopía.

La SME está integrada en la European Microscopy Society (EMS) donde desempeña una participación relevante. Como ejemplo, el Prof. José M^a Valpuesta (CNB-CSIC) ha sido presidente de la EMS formando actualmente parte de la Junta directiva como past-president, y es miembro activo de la SME. La SME forma parte igualmente de la International Federation of Societies for Microscopy (IFSM), donde igualmente hay dos representantes de la SME en la Junta Directiva (Profs. Jordi Arbiol y Raúl Arenal).

Como representantes de la SME, los miembros de su Junta Directiva participan en los comités científicos de numerosos eventos, entre los que figuran los congresos periódicos europeo (EMC) e internacional (IMC).

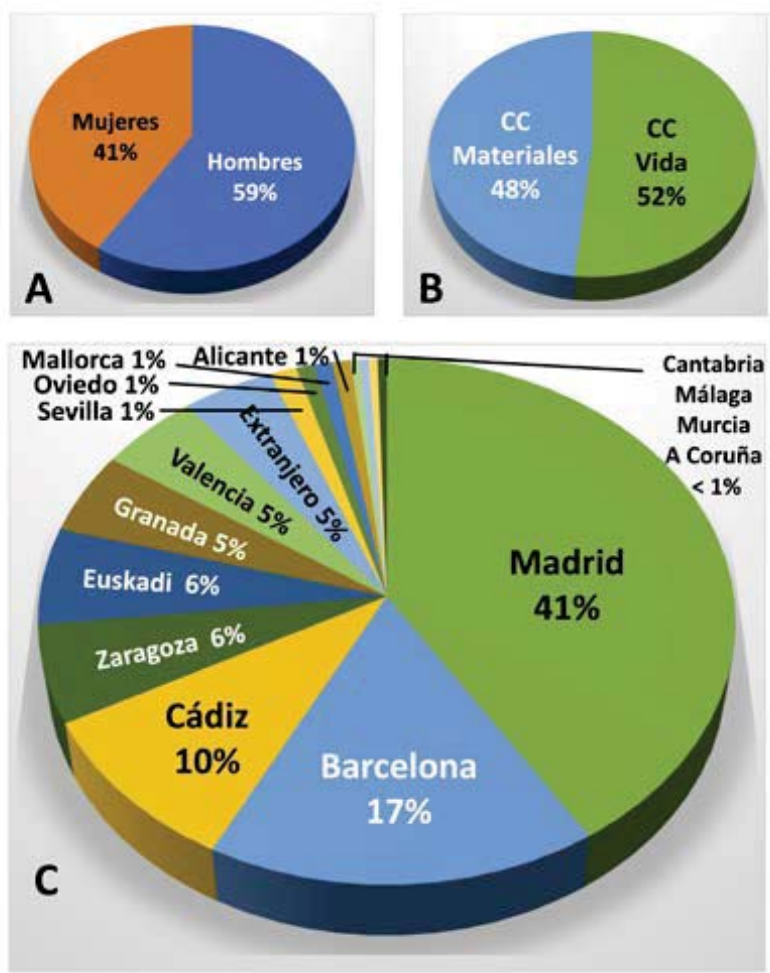


Fig. 12

Indicadores estadísticos básicos de la composición de los socios numerarios de la SME. A: Porcentaje de hombres/mujeres. B: Porcentaje de socios dedicados a las dos disciplinas fundamentales en los que se organiza la SME. C: Distribución geográfica institucional de los socios. Datos propios de la SME a diciembre de 2023.

Entre las actividades realizadas en la actualidad, la SME cofinancia la organización de cursos de formación en microscopía organizados por sus socios, y organiza cursos propios, frecuentemente como actividades pre-congreso. La SME dota a los jóvenes investigadores de becas para la participación en congresos internacionales y actividades relevantes relacionadas con la microscopía, y fomenta especialmente la actividad de estos jóvenes investigadores con la organización de premios bianuales a las mejores tesis doctorales en los ámbitos de las Ciencias de la Vida, de los Materiales y de los Desarrollos Tecnológicos.

Otras actividades incluyen la organización de eventos como concursos de imágenes, y la participación de los miembros de la Junta de la SME como expertos en dicho tipo de certámenes. Asimismo, la SME mantiene excelentes relaciones con las diversas compañías relacionadas con la microscopía, fomentando su participación en las numerosas actividades llevadas a cabo, y facilitando la transferencia de información entre éstas y los socios.

Sin duda, una de las actividades de mayor relevancia de la SME es la organización de congresos bianuales. A partir de 1984 de forma discontinua, y a partir de 2009 ya de forma continuada, las reuniones bienales de la SEME se han organizado conjuntamente con la Sociedad Portuguesa de Microscopía Electrónica (SPMicros) en la serie de congresos denominados: “Microscopy at the Frontiers of Science” (MFS).

En algunas ediciones puntuales también se han unido a las mismas la Sociedad Francesa de Microscopía Electrónica (2001), y la Sociedad Israelí de Microscopía (2013). Estos congresos, que combinan tanto la participación nacional como la internacional, se han seguido manteniendo de forma ininterrumpida hasta el pasado MFS2023 en la ciudad de Braga (Portugal), como continuación, en este caso presencial, del congreso MFS2021 organizado igualmente por el International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL) de Braga, pero llevado a cabo de forma telemática con motivo de la pandemia de COVID.

Entre las actividades de actualización de la SME, figuran como acciones prioritarias destacadas la generación de un inventario de equipos de microscopía electrónica a fecha actual, y la elaboración de un repositorio digitalizado de actividades históricas, documentos y materiales de la Sociedad, en una clara convergencia de objetivos con los presentes artículos curatoriales y la exposición “Gigantes para ver lo diminuto. Microscopía electrónica”, organizada por el MUNCYT.

Los grandes centros de microscopía electrónica

La microscopía electrónica, como las demás ramas del conocimiento, no han hecho más que evolucionar en las últimas décadas, produciendo equipamientos más sofisticados en los que se han incorporado métodos para la corrección de las aberraciones que permiten obtener cada vez mayores resoluciones. Para ello se requiere un preciso diseño de lentes, ultraestabilidad de la electrónica del equipo, y potentes sistemas de obtención, análisis, tratamiento, y reconstrucción de imágenes donde sistemas de sensores y equipos poderosos de procesamiento de datos juegan un papel clave. En paralelo, los instrumentos de análisis incorporados en los microscopios electrónicos también han ido mejorando, de forma que las técnicas de difracción o diferentes espectroscopías permiten tener imágenes y caracterizaciones muy precisas de pequeñas regiones de la muestra. La posibilidad de trabajar con muestras biológicas a bajas temperaturas ha potenciado el desarrollo de la criomicroscopía. A estas técnicas se han sumado las diferentes microscopías ópticas que han seguido evolucionando dando lugar a las microscopías correlativas. Este tipo de avances han facilitado la llegada de la microscopía electrónica 3D, con la

capacidad de realizar estudios tomográficos de la muestra con la identificación individualizada de los átomos. Los avances en las técnicas SPM son igualmente espectaculares buscando, como en el caso de la microscopía electrónica, mayor resolución, la caracterización plena de la muestra a nivel atómico, las medidas ultrarrápidas para observar la evolución de la muestra en el tiempo característico de dicho cambio, etc.

La ciencia es una actividad colaborativa a la vez que competitiva, lo que implica tener acceso a instrumental de última generación que permita expandir la frontera del conocimiento. La permanente evolución tecnológica y metodológica genera la necesidad de utilizar equipos de última generación, altamente sofisticados, que son costosos en su adquisición, instalación y mantenimiento. Esto ha ido configurando una nueva forma de plantear la manera en la que la comunidad científica accede a estos instrumentos, más racional, que optimice su uso eficiente a la vez que permite que dichos instrumentos sean de vanguardia. En el caso de España, se decidió hace casi 20 años establecer una red de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS) de carácter excepcional, que requieren elevados costes de inversión, mantenimiento y operación, y que permitan su disponibilidad para la comunidad científica mediante un acceso competitivo⁹.

⁹ El mapa actualizado de ICTS se pueden encontrar en la página web <https://www.ciencia.gob.es/Organismos-y-Centros/ICTS.html>

En el caso concreto de la microscopía electrónica, en España se ha constituido una ICTS que se denomina Infraestructura Integrada de Microscopía Electrónica de Materiales (ELECMI)¹⁰ que tiene carácter distribuido y está formada por cuatro grandes centros de microscopía electrónica que operan coordinadamente: el Centro Nacional de Microscopía Electrónica de Madrid, Laboratorio de Microscopías Avanzadas de Zaragoza, la División de Microscopía Electrónica de la Universidad de Cádiz, y la Unidad de Microscopía Electrónica Aplicada de Materiales de la Universidad de Barcelona. ELECMI ofrece acceso a métodos y técnicas avanzadas de microscopía electrónica de transmisión y barrido (con resolución de 0,05 nm en algunos casos), de preparación de muestras y de tratamiento de imágenes y datos por métodos computacionales. De esta forma se pueden cubrir las necesidades de estudio y caracterización de muestras a escala atómica en investigaciones de numerosos campos como la biomedicina, materiales, catálisis, energía, telecomunicaciones, etc.

Además de estas infraestructuras que funcionan de manera coordinada a nivel nacional, también se siguen instalando otros microscopios en lugares donde el volumen de muestras que deben ser analizadas así lo justifica, como ocurre en el caso del

crio-microscopio instalado en el Centro Nacional de Biotecnología (CNB) del CSIC o de los tres potentes microscopios instalados en el sincrotrón ALBA que constituyen la potente plataforma JEMCA (Joint Electron Microscopy Center at ALBA).

¹⁰ Más información sobre la ICTS ELECMI se puede encontrar en su página web: <https://elecmi.es/>

Conclusiones

Este artículo presenta un breve recorrido por la historia de la microscopía electrónica española usando como referentes la decena de equipos que integran la exposición, a la vez que se ha intentado mostrar cómo, una vez pasado el tiempo cubierto por la misma, la comunidad científica española ha mantenido, con esfuerzo y perseverancia, unas capacidades que le permiten mantener su competitividad, sin perder de vista que todavía quedan problemas estructurales por resolver.

Es evidente que las limitaciones de espacio y el contexto de un artículo curatorial limitan nuestra ambición de ser más exhaustivos y profundos. En cualquier caso, se espera que a través de las pinceladas proporcionadas en estos tres artículos curatoriales, el lector o la lectora de los mismos tenga una visión más cercana de la apasionante irrupción que supuso la microscopía electrónica en el panorama científico y tecnológico, haya contemplado su vertiginoso desarrollo e impacto transversal, se haya puesto al día de los últimos avances en esta técnica, conozca un poco más sobre el papel jugado por los científicos y científicas españolas en todo este proceso y, quizás, desee seguir ampliando sus conocimientos sobre estos magníficos y sofisticados instrumentos, que han sido, son y serán nuestros “ojos” para explorar la materia a escala diminuta.

Referencias

Aballe Caride, M. (1989) Situación de la microscopía electrónica en España, 1988. *Bol. Soc. Esp. de Cerámica y Vidrio*, 28 (4), 293-297.

Aballe Caride, M., López Ruiz, J., Adeva Ramos, P., y Badía Pérez, J. M. (1996). *Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X*. CSIC.

Alché Ramírez, J. D. y Serena, P. A. (2025). La microscopía electrónica. Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica. Artículo curatorial en este mismo catálogo.

Asenjo, A., García-Martín, J. M. y Serena P. A. (2022). 40 años viendo átomos. *Revista Española de Física*, 36(3), 5-11.

Barbero, S. (2025). Viendo más allá de la luz: los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica (1941-1964). Artículo curatorial en este mismo catálogo.

Barbero, S. (2024). Viendo más allá de la luz: El inicio de la microscopía electrónica en España a través de su primer microscopio electrónico (1941-1964). *Óptica Pura y Aplicada*, 57 (2) 51172.

Baró, A. M., Miranda, R., Alamán, X., García, N., Binning, G., Rohrer, H., Gerber, C. H., y Carrascosa, J. L. (1985). Determination of Surface Topography of Biological Specimens at High Resolution by Scanning Tunneling Microscopy. *Nature*, 315, 253-254.

Bru Villaseca, L. (1936). El microscopio de electrones. *Revista Las Ciencias de Madrid*, 3(1), 1-11.

Bru Villaseca, L. (1981). Cincuenta años de difracción y microscopía electrónicas. *Aula de Cultura Científica* 11, Fundación Marcelino Botín.

Bru Villaseca, L. (1992). The early days of electron microscopy in Spain. *European Microscopy & Analysis*, September, 13-15.

Catalina, F. (1962). La microscopía electrónica en España. *Luz: Revista de Información del Instituto de Óptica "Daza de Valdes"*, 10 (mayo-junio), 43-45.

Fernández-Galiano, D. (1994). Apuntes sobre la historia de la microscopía en España. *Microbiología SEM*, 10, 343-356.

González Ibáñez, C., y Santamaría García, A. (Ed.) (2009). *Física y Química en la Colina de los Chopos. 75 años de investigación en el edificio Rockefeller del CSIC (1932-2007)*, CSIC.

González Santander, R. (1965). Actualidad de la microscopía electrónica en España. *Arch. Fac. Med.*, 6, 389-395.

González Santander, R. (1966). *Manual de Microscopía Electrónica*. Instituto Cajal – CSIC.

González Santander, R. (1998). Fifty years of electron microscopy in Spain. *European Microscopy & Analysis*, septiembre, 9-12.

González Santander, R., y Martínez Cuadrado, G. (1973). Análisis de la microscopía electrónica española en 1973. *Arbor*, 84 (327), 101-108.

González Santander, R., y Martínez Cuadrado, G. (1973). Los ochenta y tres microscopios instalados en España, *Arch. Fac. Med. Mad.* 24(4), 221-234.

Hawkes, P. W. (Editor) (2003). *Advances in Imaging and Electron Physics*, vol 127. Academic Press.

Müller, H. O. (1940). Fundamentos y desarrollo del hipermicroscopio. *Investigación y Progreso* 11, 3-12.

Oliva Aldámiz, H. (1964). *Ultraestructura celular*. Editorial Paz Montalvo Diana.

Otero Carvajal, L. E. (Dir.), Núñez Díaz-Balart, M., Gómez Bravo, G., López Sánchez, J. M., Simón Arce, R. (2006). *La destrucción de la ciencia en España*. Editorial Complutense.

Otero, J. M. (1944). Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico. *Arbor*, 1, 85-102.

Puig-Samper Mulero, M. A. (Ed.) (2007). *Tiempos de investigación. JAE-CSIC, cien años de ciencia en España*. CSIC.

Romero de Pablos, A., y Santesmases, M. J. (Ed.) (2008). *Cien años de política científica en España*. Fundación BBVA.

Ruska, E. (1934). El microscopio de rayos catódicos como ultramicroscopio. *Investigación y Progreso*, 8, 189-191.

Ruska, H., von Borries, B., y Ruska, E. (1940). La importancia de la hipermicroscopía en la investigación de los virus. *Investigación y Progreso*, 11, 71-79.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (II): El primer tercio del siglo XX. *Revista Española de Física*, 17(2), 8-14.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (III): La Guerra Civil y sus consecuencias. *Revista Española de Física*, 17(3), 9-15.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (IV): la Era Franquista. *Revista Española de Física*, 17(4), 7-13.

Santesmases, M. J. (2007). Viajes y memoria: las ciencias en España antes y después de la Guerra Civil. *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia*, 58(2), 213-230.

Sanz Menéndez, L. (1996). La construcción institucional de la política científica y tecnológica en el franquismo. *Redes (Universidad Nacional de Quilmes)*, 3(6), 77-123.

La exposición

GIGANTES PARA VER LO DIMINUTO

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

La exposición temporal “Gigantes para ver lo diminuto” propone un recorrido en torno a diez microscopios electrónicos que forman parte de la colección del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología. Estos instrumentos científicos representan los inicios de la microscopía electrónica en España, técnica que actualmente se encuentra ampliamente integrada en universidades, centros y laboratorios de investigación.

Desde la utilización de la luz en la microscopía óptica al uso del haz de electrones en los primeros microscopios electrónicos, se evidencia un abismo conceptual, tecnológico e industrial que ha supuesto notables beneficios para la sociedad, especialmente en el ámbito de la salud, cuyos progresos seguirán desvelándose en el futuro más próximo.







EN REALIDAD VEMOS CON NUESTRO CEREBRO

El nervio óptico transporta los impulsos eléctricos generados en la retina hasta diferentes áreas de la corteza cerebral donde se interpretan y cobran sentido, formando las imágenes. El cerebro, órgano con el que realmente vemos, dirige el funcionamiento de las diferentes partes de nuestro cuerpo y tiene control sobre nuestros pensamientos, emociones y capacidades intelectuales. Nuestro sistema nervioso se basa en unas células especializadas, denominadas neuronas, cuya estructura y funcionalidad fueron descritas por Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) a finales del siglo XIX, sentando los fundamentos de la neurociencia moderna. Cajal realizó numerosos estudios sobre la retina de los seres humanos y de otras especies de vertebrados, y por sus descubrimientos recibió el Premio Nobel en 1906.

IN REALITY, WE SEE WITH OUR BRAINS.

The optic nerve transmits the electrical impulses generated in the retina to different areas of the cerebral cortex where they are interpreted and make sense, forming images. The brain, the organ with which we really see, directs the functioning of the different parts of our body and has control over our thoughts, emotions and capacities. Our nervous system is based on specialized cells, known as neurons, whose structure and functionality were described by Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) at the end of the 19th century, laying the foundations of modern neurosciences. Cajal conducted numerous studies on the retina of humans and other vertebrate species and, for his discoveries, he received the Nobel Prize in 1906.

Autoretrato
de Santiago
Ramón y Cajal en
su laboratorio de
neurociencia.
Lugar: Madrid, España.
1900-1905.

Esquema de
un neurón.
Anatomía de la
corteza visual del
cerebro humano.
Lugar: Madrid, España.
1900-1905.



LAS DOS REVOLUCIONES EN LA FÍSICA DEL SIGLO XX

A finales del siglo XIX quedaban por resolver dos problemas para terminar de construir el edificio de la física clásica: la naturaleza del rayo (movimiento ultraveloz) asociado a la emisión del campo negro. La resolución de ambos problemas vino de la mano de dos nuevas teorías que cambiaron los fundamentos de la física: la Teoría de la Relatividad Especial propuesta por Albert Einstein (1905-1905) y la mecánica cuántica. Esta última fue fruto de un conjunto de trabajos realizados por el primer tercio del siglo XX. La mecánica cuántica comenzó a desarrollarse con los trabajos de Max Planck (1858-1947) y Albert Einstein, quienes contribuyeron por parte de fundamentos (cuantización) y análisis no apoyados con los fundamentos de la mecánica cuántica (1905-1907).

THE TWO REVOLUTIONS IN 20TH CENTURY PHYSICS
At the end of the 19th century, two problems remained to be solved to complete the structure of classical physics: the nature of the ray (ultrafast movement) associated with the emission of the black body radiation. The resolution of both problems came from two new theories that changed the foundations of physics: the Theory of Special Relativity proposed by Albert Einstein (1905-1905) and quantum mechanics. The latter was the result of a series of works carried out by the first third of the 20th century. Quantum mechanics began to develop with the works of Max Planck (1858-1947) and Albert Einstein, who contributed by part of the foundations (quantization) and analysis not supported by the foundations of quantum mechanics (1905-1907).



PARTICIPANTES
DE LA
CONFERENCIA
DE 1927 SOBRE
MECÁNICA
CUÁNTICA

LA SORPRENDENTE MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica surgió a finales de los siglos XIX y principios del XX, cuando se descubrió que la luz se comporta como si estuviera formada por paquetes de energía llamados "cuantos" o "fotones". Esto llevó a la formulación de la mecánica cuántica, que describe el comportamiento de la materia a escala atómica y subatómica. La mecánica cuántica se diferencia de la mecánica clásica en que la energía no es continua, sino que está cuantizada. Además, la mecánica cuántica introduce el concepto de probabilidad, lo que significa que no se puede predecir con certeza el resultado de una medición, sino que solo se puede calcular la probabilidad de que ocurra un determinado evento.

THE SURPRISING QUANTUM MECHANICS
Quantum mechanics emerged at the end of the 19th and beginning of the 20th century, when it was discovered that light behaves as if it were made of packets of energy called "quanta" or "photons". This led to the formulation of quantum mechanics, which describes the behavior of matter at atomic and subatomic scales. Quantum mechanics differs from classical mechanics in that energy is not continuous, but quantized. Additionally, quantum mechanics introduces the concept of probability, meaning that the outcome of a measurement cannot be predicted with certainty, but only the probability of a particular event occurring can be calculated.

ELIGE UN MICROSCOPIO

Aprende a montar uno de estos microscopios con sus piezas



MICROSCOPIO ÓPTICO

MO

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN

TEM



MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

SEM



Seleccionar al azar



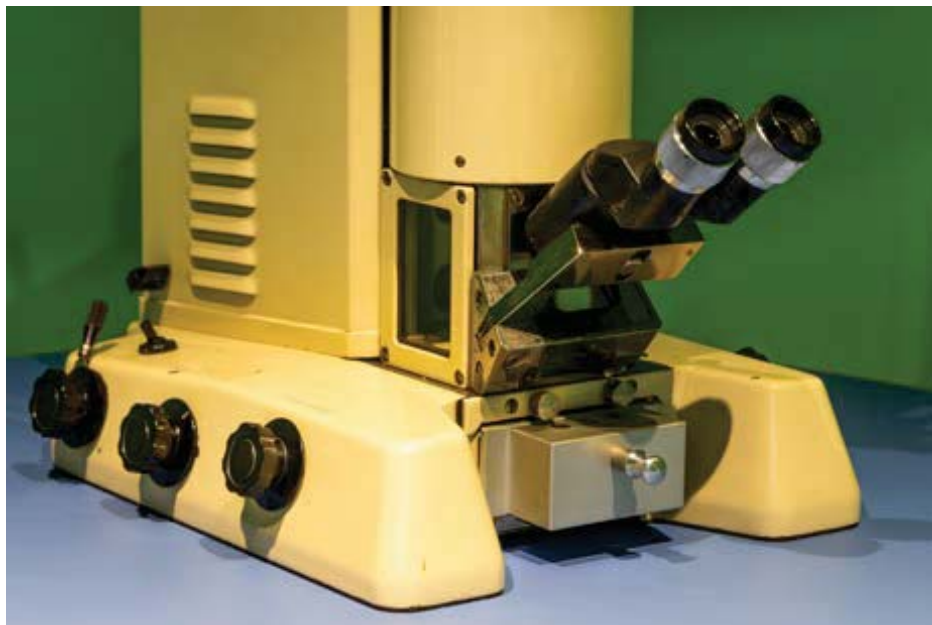


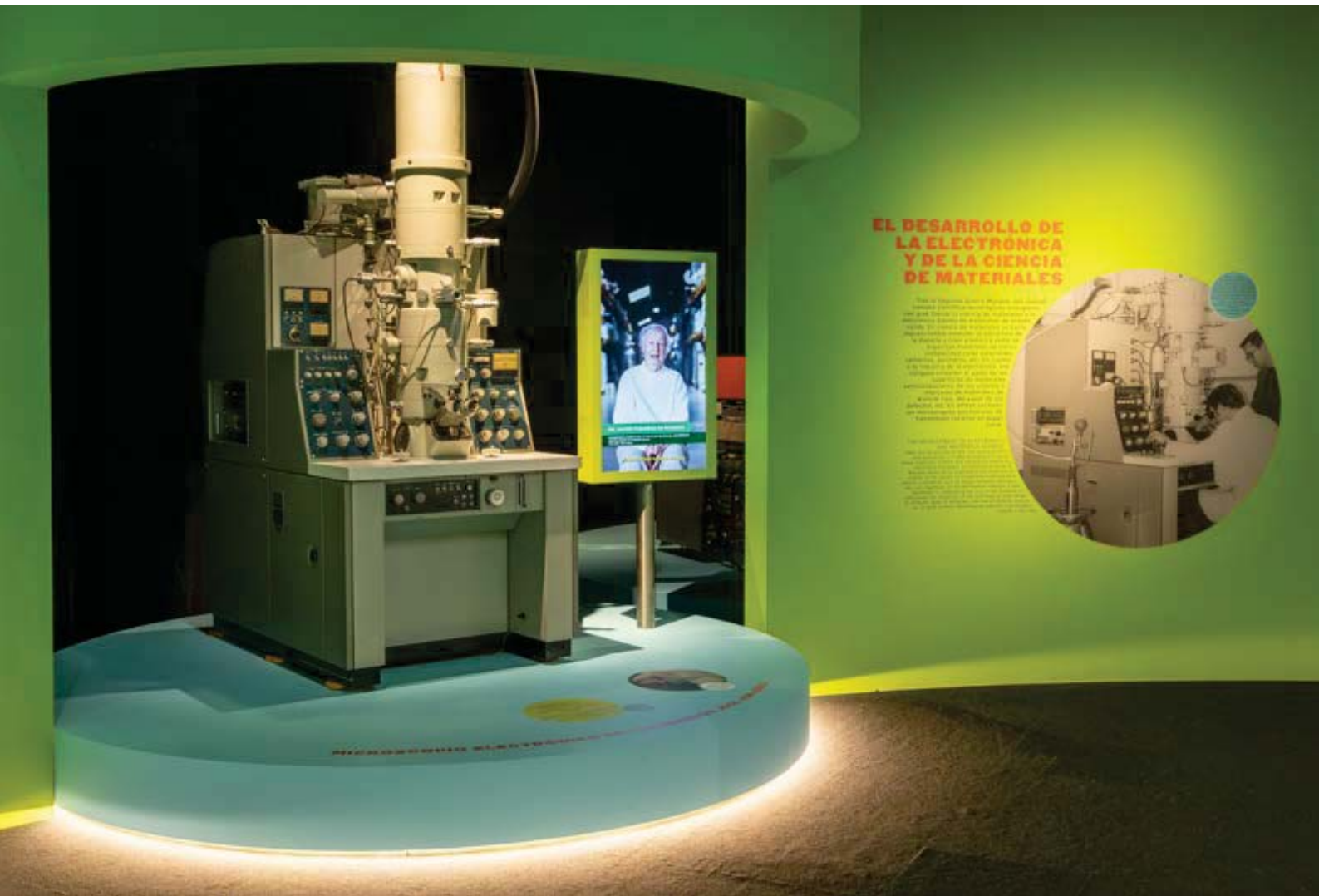












EL DESARROLLO DE LA ELECTRONICA Y DE LA CIENCIA DE MATERIALES

Todo lo que se ha hecho en el mundo de la electrónica y de la ciencia de materiales, desde los primeros dispositivos electrónicos hasta los más avanzados, ha sido posible gracias a los esfuerzos de una gran cantidad de científicos y técnicos. En este sentido, el desarrollo de la electrónica y de la ciencia de materiales ha sido un proceso continuo y constante, que ha permitido la creación de una gran variedad de dispositivos y materiales que han revolucionado nuestra vida cotidiana.

En el ámbito de la electrónica, se han desarrollado una gran variedad de dispositivos, desde los primeros tubos de vacío hasta los más modernos transistores y microprocesadores. Estos dispositivos han permitido la creación de una gran variedad de dispositivos electrónicos, desde los primeros radios hasta los más modernos teléfonos móviles y ordenadores.

En el ámbito de la ciencia de materiales, se han desarrollado una gran variedad de materiales, desde los primeros metales hasta los más modernos polímeros y nanomateriales. Estos materiales han permitido la creación de una gran variedad de dispositivos y materiales que han revolucionado nuestra vida cotidiana.









LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS EN MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

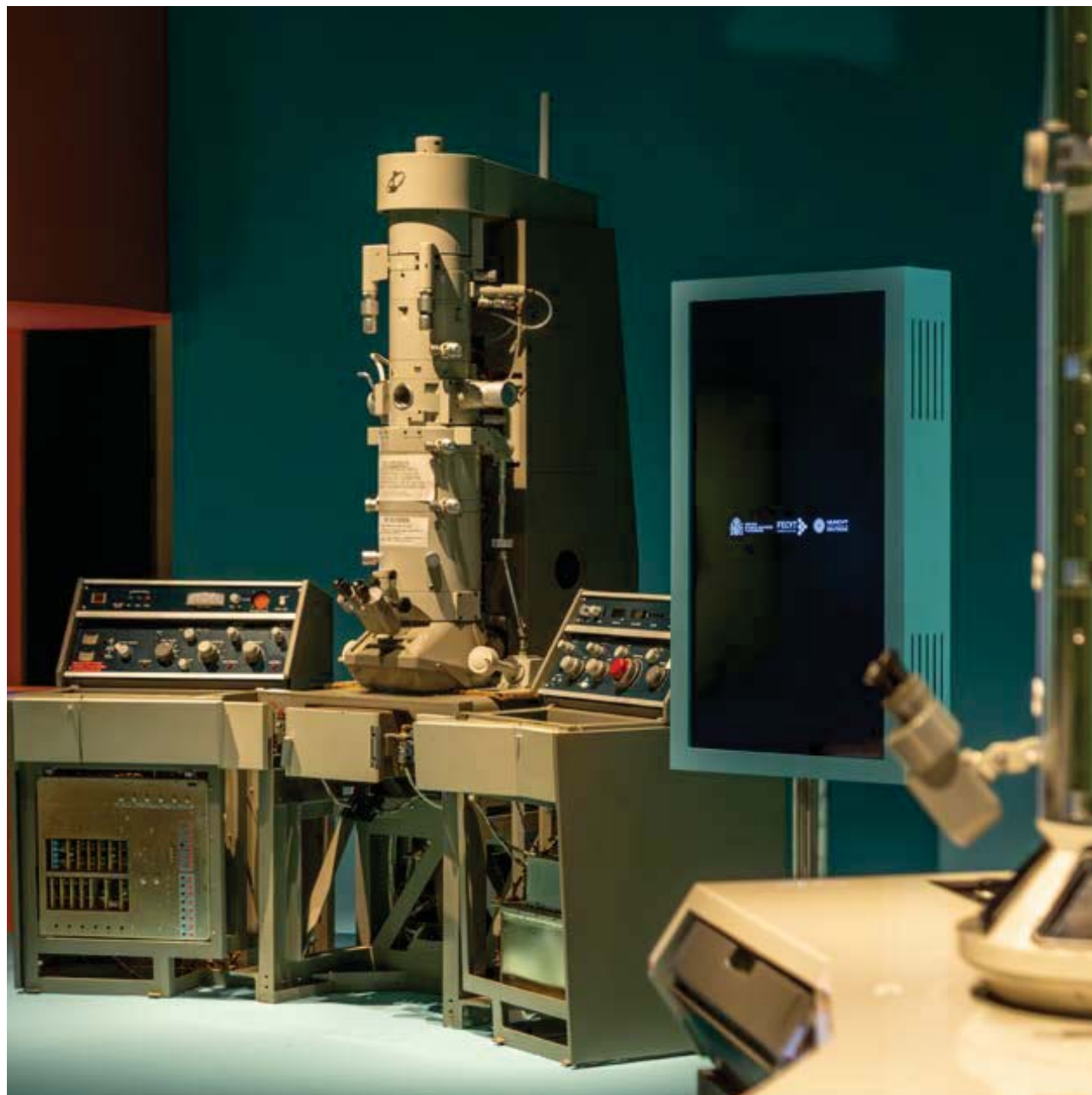
Antes de introducir una muestra en el microscopio electrónico requiere que los especímenes tengan una geometría y un tamaño de preparación que permitan obtener imágenes de calidad. La preparación de las muestras de los materiales que se van a observar debe cumplir con los requisitos de tamaño, forma y composición química para ser introducida en el microscopio electrónico y poder obtener imágenes de alta calidad.



CORTAR, SECCIONAR, DESHIDRATAR, METALIZAR...

La muestra debe ser preparada para ser introducida en el microscopio electrónico. Este proceso incluye la preparación de la muestra, la sección, la deshidratación y la metalización. La preparación de la muestra debe ser cuidadosa para evitar dañar la muestra o introducir artefactos que puedan afectar la calidad de las imágenes.





UN SIGLO DE IMÁGENES

Durante los casi cien años de desarrollo de los microscopios electrónicos, estos han cambiado su diseño, sobre todo con la incorporación en la década de 1980 de las técnicas digitales. También han ido incorporando más tipos de instrumentos que han incrementado su versatilidad. Sin embargo, los principios esenciales de su funcionamiento siguen siendo los mismos: electrones incide sobre una muestra eléctrica negativa a una tensión en una muestra que el fin de amplificar la imagen con una impresionante resolución.

LA CENTURY OF IMAGERY
During the almost one hundred years of development of electron microscopy, the design of these instruments has changed, especially with the incorporation in the 1980s of digital techniques. They have also incorporated more types of instruments that have increased their versatility. However, the essential principles of their functioning have remained the same: electrons strike a negatively charged sample at a voltage in order to amplify the image with an impressive resolution.



UNA SORPRESA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA: EL EFECTO TUNEL

En la física cuántica, el efecto túnel es un fenómeno que ocurre a escala atómica y subatómica. Consiste en la capacidad de una partícula para atravesar una barrera de potencial que, clásicamente, no debería poder superar. Este efecto es fundamental en muchos procesos físicos y químicos, como la fusión nuclear en las estrellas o la conducción en los semiconductores.



LOS DETALLES INTIMOS DE LA NATURALEZA



La microscopía electrónica de alta resolución (TEM) ha revolucionado la biología, permitiendo ver el interior de las células y de las moléculas. Esto ha permitido descubrir detalles sobre la estructura de las proteínas y el funcionamiento de los orgánulos celulares.



LAS MICROBES DE PROXIMIDAD

Las microbacterias son organismos que viven en estrecha proximidad a las células eucariotas, formando simbiosis mutualistas. Estas bacterias desempeñan un papel crucial en el metabolismo de las células y en la respuesta inmunitaria.











MICROSCOPIA ELECTRÓNICA: UNA GRAN FAMILIA

Las microscopías electrónicas se dividen en dos grandes familias: la de transmisión y la de barrido. Ambas se subdividen en dos tipos: de haz de electrones y de haz de iones. Las de haz de electrones se dividen en de haz de electrones y de haz de electrones. Las de haz de iones se dividen en de haz de iones y de haz de iones.

Las microscopías electrónicas de haz de electrones se dividen en de haz de electrones y de haz de electrones. Las de haz de electrones se dividen en de haz de electrones y de haz de electrones. Las de haz de electrones se dividen en de haz de electrones y de haz de electrones.

Las microscopías electrónicas de haz de iones se dividen en de haz de iones y de haz de iones. Las de haz de iones se dividen en de haz de iones y de haz de iones. Las de haz de iones se dividen en de haz de iones y de haz de iones.



PALPANDO LA MATERIA: LAS MICROSCOPIAS DE PROXIMIDAD

Las microscopías de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad. Las de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad. Las de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad.

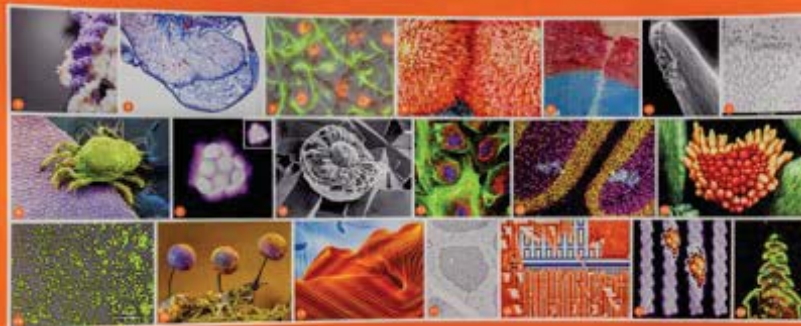
Las microscopías de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad. Las de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad. Las de proximidad se dividen en de proximidad y de proximidad.



LA BELLEZA DEL NANOMUNDO

Los investigadores del Instituto de Estudios de la Ciencia están trabajando en la creación de nanomateriales que imiten la estructura de los materiales naturales. Los nanomateriales son materiales que tienen una estructura a escala nanométrica (entre 1 y 100 nanómetros) y que pueden tener propiedades muy diferentes a los materiales convencionales. Los nanomateriales se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde la medicina hasta la electrónica.

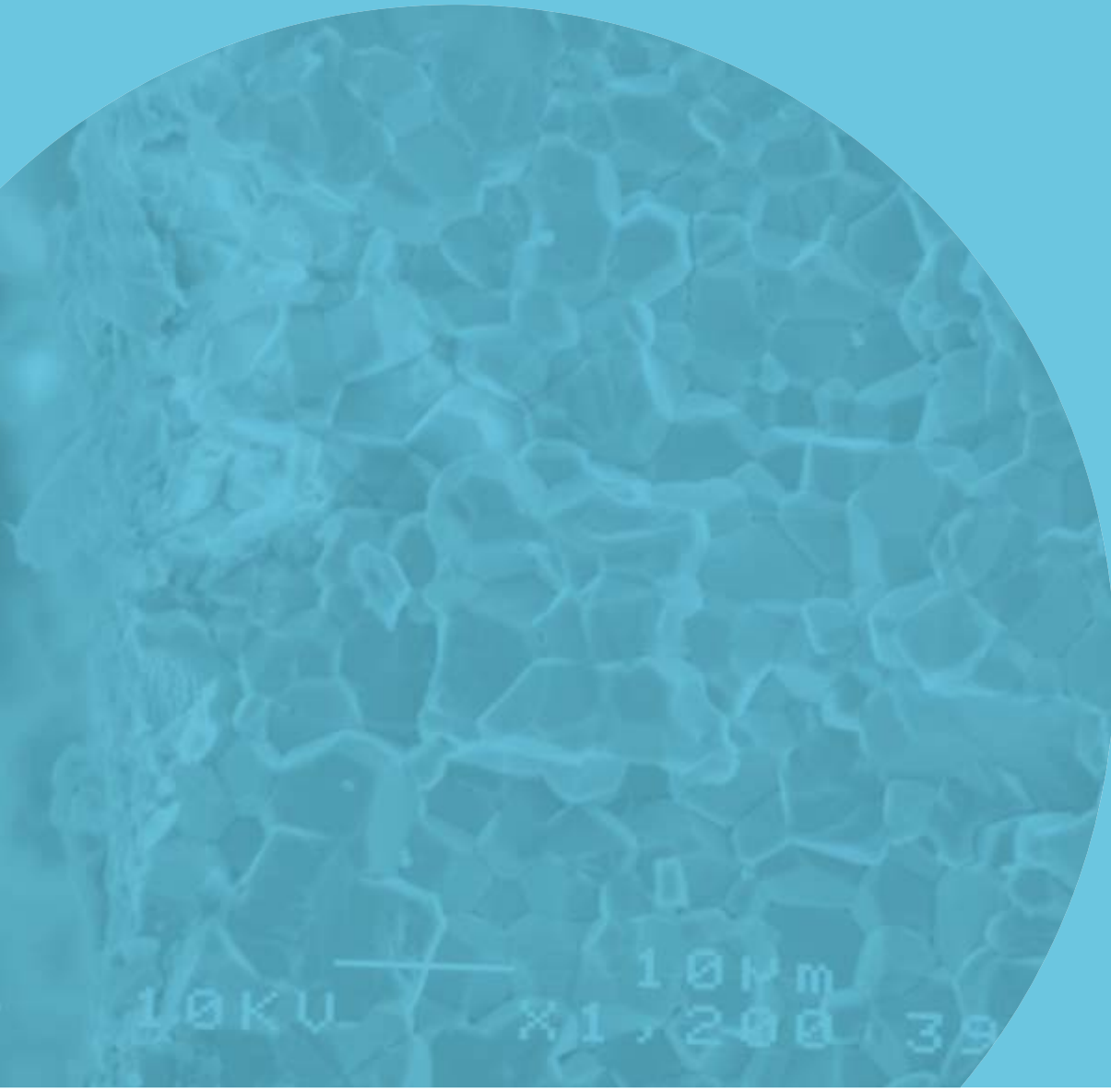
Los nanomateriales se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde la medicina hasta la electrónica. Los nanomateriales se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde la medicina hasta la electrónica.



Los nanomateriales se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde la medicina hasta la electrónica. Los nanomateriales se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde la medicina hasta la electrónica.



La colección





1. Microscopio óptico c. 1928

Fabricado por Ernst Leitz
Oculares de 5X, 8X y 16X
MUNCYT CE2025/001/0001

Imagen: Scope Producciones



Imagen: Scope Producciones

2. Microscopio electrónico de transmisión RCA EMU-2A

1946

Fabricado por Radio Corporation of America (RCA)

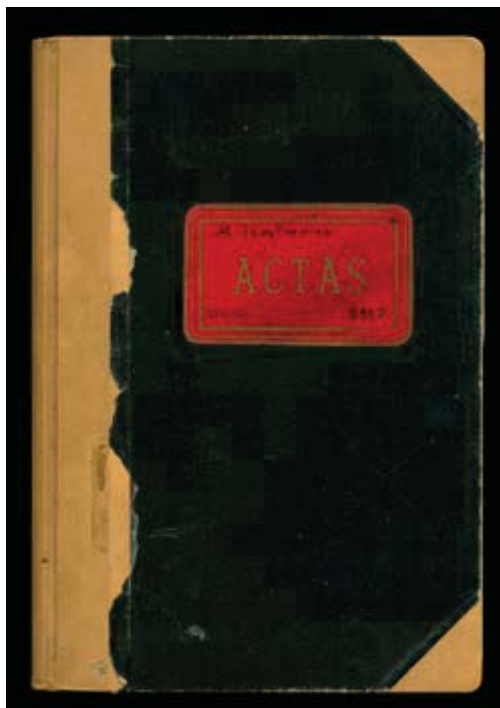
Procedente del Instituto de Óptica "Daza de Valdés" (IO-CSIC)

Resolución: 10 nm

Aumentos: 100-20 000X

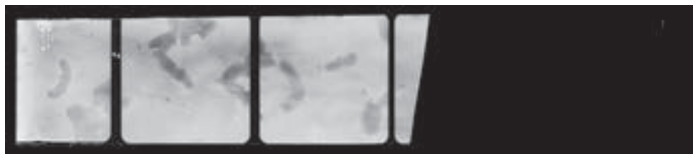
Voltaje acelerador: 50 kV

MUNCYT CE2009/015/0001

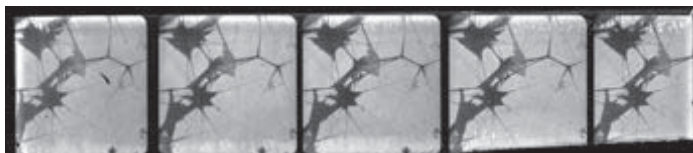


3. Libro de registro

Libro de registro de las placas
fotográficas realizadas con el
microscopio electrónico de transmisión
RCA EMU-2A entre 1947 y 1965
MUNCYT CE2009/015/0001



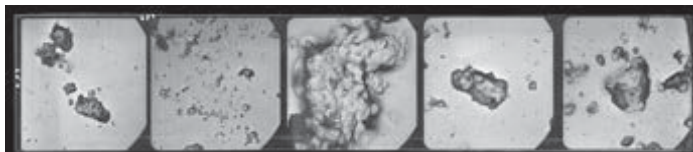
4. Número de placa: 1 / Fecha: 1947 / Muestra: *Mycobacterium Leprae*
MUNCYT CE2009/015/0001



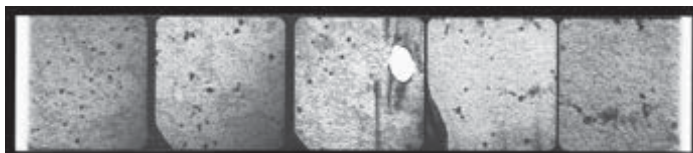
5. Número de placa: 41 / Fecha: 1949 / Muestra: Óxido de Zinc
MUNCYT CE2009/015/0001



6. Número de placa: 599 / Fecha: 1957 / Muestra: Réplica de arcillas
MUNCYT CE2009/015/0001



7. Número de placa: 659 / Fecha: 1957 / Muestra: Réplica de
pechblenda española MUNCYT CE2009/015/0001



8. Número de placa: 681 / Fecha: 1957 / Muestra: Virus de la gripe
MUNCYT CE2009/015/0001



Imagen: Yolanda Villaverde

9. Microscopio electrónico de transmisión TESLA BS 242A

1962

Fabricado por Technika Slaboproudová (TESLA)

Procedente del Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz

Resolución: 3,5 nm

Aumentos: 1000-30 000X

Voltaje acelerador: 30-75 kV

MUNCYT CE1992/024/0001



Imagen: Scope Producciones

10. Microscopio electrónico de transmisión Siemens Elmiskop 1A

1964

Fabricado por Siemens & Halske A. G.
Procedente del Instituto de Óptica
"Daza de Valdés" (IO-CSIC)

Resolución: 0,4 nm

Aumentos: 200 000X

Voltaje acelerador: 40-100 kV

En la imagen, de izquierda a derecha: microscopio, controlador de temperatura de filamento y fuente de alimentación.

MUNCYT CE2009/015/0002



Imagen: José Latova

11. Microscopio electrónico de transmisión JEOL JEM 200A

1972

Fabricado por Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL)

Depósito de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid

Resolución: 0,5 nm

Aumentos: 1000–200 000X

Voltaje acelerador: 50–200 kV

MUNCYT DO1995/031/0736. Depósito de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid



Imagen: José Latova

12. Microscopio electrónico de transmisión Hitachi HU 12A

1974

Fabricado por Hitachi Ltd.

Procedente del Hospital Universitario
12 de Octubre de Madrid

Resolución: 0,2 nm

Aumentos: 500 000X

Voltaje acelerador: 10-125 kV

MUNCYT CE2012/032/0001



Imagen: Scope Producciones

13. Microscopio electrónico de transmisión JEOL JEM 100B

c. 1978

Fabricado por Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL)

Procedente del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CBM-CSIC-UAM)

Resolución: 0,2 nm

Aumentos: 500 000X

Voltaje de aceleración: 20-100 kV

MUNCYT CE1993/002/0001



Imagen: Scope Producciones

14. Microscopio electrónico de barrido ISI SMS-2

1974

Fabricado por International Scientific Instruments (ISI)

Procedente del Real Jardín Botánico (RJB-CSIC)

Resolución: 7 nm

Aumentos: 30-160 000X

Voltaje acelerador: 2-25 kV

MUNCYT CE1996/026/0001



Imagen: Scope Producciones

15. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-35C

1978

Fabricado por Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd.

Procedente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid

Resolución: 10 nm

Aumentos: 10-180 000X

Voltaje acelerador: 0-39 kV

MUNCYT CE2009/012/0001



Imagen: Scope Producciones

16. Microscopio electrónico de barrido ISI SS-60

1981

Fabricado por International Scientific Instruments, Inc. (ISI)

Procedente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid

Resolución: 4 nm

Aumentos: 500-200 000X

Voltaje acelerador: 30 kV

MUNCYT CE2008/020/0001

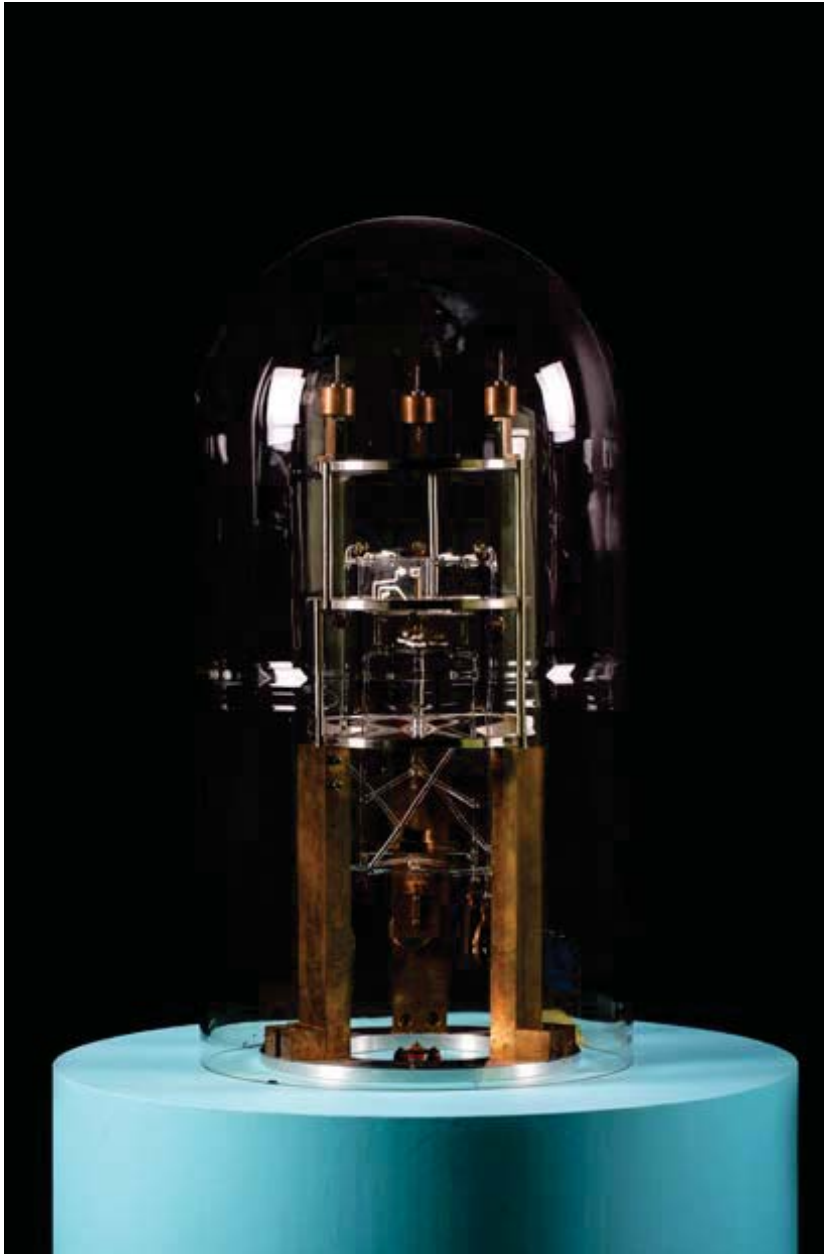


Imagen: Scope Producciones

17. Microscopio de efecto túnel

1984

Prototipo conocido como “La punta”

Fabricado en los Laboratorios de investigación de IBM en Zúrich (Rüschlikon, Suiza)

Procedente de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid

Resolución lateral: 0,2 nm

Resolución vertical: 0,05 nm

Corriente túnel: 1nA

Voltaje de operación: 0,001–10 V

MUNCYT CE2019/014/0001

English version

Credits

Ministry of Science, Innovation, and Universities

Minister
Diana Morant Ripoll

State Secretariat for Science, Innovation, and Universities

Secretary of State
Juan Cruz Cigudosa García

Spanish Foundation for Science and Technology

General Director
Izaskun Lacunza Aguirrebengoa

National Museum of Science and Technology

Director
Fernando Luis Fontes Blanco

Scientific advisor

Pedro Amalio Serena Domingo
Juan de Dios Alché Ramírez

Coordinator

Rosa María Martín Latorre
Ignacio de la Lastra González

Museum staff

Joaquina Leal Pérez-Chao
Emilio José Bande Fuentes
Isabel Tarancón Santana
Marta Lestayo Ortega
Josefa Prados Barrera

Exhibition design

Jorge Ruiz Ampuero

Production and assembly

Amazing up

Audiovisual narratives

B23 S.C.P.

Audioguide

Guidum y Aebia

Transport Company

Tti - Técnica de Transportes Internacionales

Catalogue design and layout

Studio Etérea

Catalogue printing

Advantia Comunicación Gráfica S. A.

Edited by

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología

E-NIPO 151250165

NIPO 15125015X

DL M-17428-2025

Publication included in the publishing programme of the General Technical Secretariat of the Ministry of Science, Innovation and Universities for the year 2025. Catalogue of publications of the General State Administration: <https://cpage.mpr.gob.es>

Special thanks to

Arturo M. Baró Vidal
Carmen Prada Moral
Federico Rojo Todo
Javier Piqueras de Noriega
José Antonio Aznárez Candao
José López Carrascosa
José María Badía Pérez
José Ygnacio Pastor Caño
Josefa Jiménez Albarrán
Julio Gómez Herrero
Marina Alonso Riaño
Miguel Ángel Martínez González
Sergio Barbero Briones
Horacio Oliva Aldamiz, *in memoriam*

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Hospital Universitario 12 de Octubre
Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz
Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL)
Legado Cajal
Sociedad de Microscopía de España (SME)

Follow us

www.muncyt.es

✕ @muncyt

f facebook.com/muncyt

@muncyt_es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



MUNCYT
MUSEO NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Presentation

Almost all of us have in mind a stereotype, a generalisation, when portraying a scientist. For most of us it is a mature man with a lab coat, a lush, grey-haired and untidy mane, glasses and a bushy white moustache. This cliché probably has its origin in Albert Einstein's (1879-1955) image.

Currently, and luckily, this stereotype is being gradually replaced by other mental images, such as that of a young woman with a lab coat, safety glasses and a flask or a test tube in her hand. Nevertheless, for me, this idealised representation is that of a grey-haired man, with thin hair and a lab coat sitting at a table with some samples and his eye placed just above the lens of a microscope.

This image stems from the omnipresence, during my early life, of my maternal grandfather, Andrés Blanco Loizelier (1917-2012), veterinarian, microbiologist and researcher. Due to life circumstances, both my brother and I were raised, largely, by our maternal grandparents. My parents were very young, and they delegated, by and large, the raising of their children to my grandparents so they could enjoy their youth, partially interrupted by their premature parenthood, more. This did not entail a problem for us at all, because my grandfather, that was still young and active during our childhood, instilled in us, among many other things, the love for nature, living creatures, art, culture, museums and science.

As a matter of fact, the first museums that I visited in my life, that were natural science museums, I

visited them with my grandfather. To this day, I still remember, as if it were yesterday, entering the hall of the Natural History Museum in London, accompanied by my grandfather, and seeing the large skeleton of the Diplodocus, nicknamed "Dippy" (it has been now replaced by the skeleton of an impressive blue whale hanging from the ceiling), the section of the trunk of a giant sequoia (*Sequoiadendron giganteum*), with its growth rings and timelines, in the landing of the main staircase, or the display cabinet with the coelacanth (*Latimeria chalumnae*), a prehistoric fish with four fins and an intimidating appearance that was thought extinct until it was rediscovered alive in South Africa in 1938. This passion for natural sciences, culture and museums was ignited in me during those visits with my grandfather, and they were the seed for what would become my future career. Even today I enter museums and I become thrilled with the marvels that they display with the same passion and curiosity of that boy that I was.

During those first years of my life, when I was approximately between 7 and 15 years old, my grandfather worked at two laboratories, one of them public, linked to the National Institute for Agricultural Research (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias), and the other one private, financed by a Fulbright Programme, thanks to his contacts with several universities and Northamerican research centres. Because of this relationship, he was appointed as a member of The New York Academy of Sciences in 1982, one of the many honours he received throughout

his life. At that time, in which he combined his scientific work developing vaccines for animal diseases with his family life, I had the chance to visit several times the laboratories where he worked, where he had guinea pigs and rats for his experiments, some of which were spared from their cruel fate because they were adopted as pets at home. Those laboratories were equipped with microscopes and other strange devices for me, such as the slicers (microtomes), with which thin histological sections of samples, previously immersed in paraffin and stained, were obtained. I sometimes even sat on his knees, and he would let me look through the lenses of the microscopes to discover, astonished, the things that could be seen with them.

My grandfather's field of study was, mainly, avian diseases, although sometimes, exotic animals from the zoo or from more or less legal imports arrived at the laboratory when they were carriers of some disease. I remember, specially, his studies on the botulinum toxin, produced by *Clostridium botulinum*, when he mentioned me that just a few grams could kill a whole city as big as Madrid; or on psittacosis or ornithosis, caused by *Chlamydophila psittaci*, when he seriously warned us not even thinking of getting close to parrots and parakeets. He got to be a world authority precisely on chlamydiosis, and I had the great privilege to be the "proofreader and editor" of his last scientific article: "*Coriomeningitis clamidial: una enfermedad autoinmune*" ("*Chlamydial choromeningitis: an autoimmune disease*"), published in the Annals of the Royal Academy of Veterinary Science (Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias) in 2003.

With a grandfather like that, it is not surprising that, since my childhood, I developed a passion for natural sciences, particularly for zoology, that I nurtured not only by devouring books, but also with the "field experience" at the house that my grandparents had in the mountains of Madrid. There I compiled my first collection of butterflies and insects, and I also carried out my first archaeological and paleontological excavations in which I barely found a chicken bone or a piece of a flowerpot, but their methodology with the use of grids and contexts tried to be as scientific as possible.

Nevertheless, the most exciting moment of my stage as a junior naturalist came when I was a teenager, when my grandfather gave me his old Ernst Leitz Wetzlar microscope with which he had started his career. Together with the microscope, he gave me a complete set of previously prepared samples, slides and cover slips, and Canada balsam to prepare my own samples. I still remember the great excitement with which I received that present. A "real" microscope, with several sets of lenses and several hundred times magnification that had nothing to do with the toy microscopes with which the kids were introduced in those times to the knowledge of the microcosmos.

That microscope, now donated to the National Museum of Science and Technology (Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, MUNCYT), and part of the exhibition shown here, provided me with countless moments of amazement and pleasure related to the discovery of the minuscule things. Back then I lived with my family in Malaga, and I remember going on

expeditions to the garden to collect plants, seeds, dirty water, insects and small objects to watch them under the lenses of my microscope. The most exciting of it all was to watch the protozoans and the small life forms that could live in a drop of water collected from a puddle, especially in autumn, when it was infused with leaves. It is not difficult to imagine the amazement that Anton van Leeuwenhoek (1632-1723), Robert Hooke (1635-1703) and all those that came after them felt when opening the doors to this new microscopic world. Under the lenses I slowly discovered, with that microscope, that unknown land, that world that surrounds us and that exists beyond the limitations of our sight. The most powerful lenses, with a magnifying power of 1,000, were immersion lenses, and had to be immersed in cedar oil to obtain the maximum possible resolution. That was the limit of my microscope, and almost of the optical microscopy at that time. Back then, my grandfather had already told me about electron microscopy and its enormous possibilities. Although I never got the chance to have a look at one of those microscopes, I was marvelled with the images that were obtained with them, some of them published in 3D and in full colour in magazines such as *Muy Interesante* or *National Geographic*, two of my bedside magazines at that time.

Due to all this, when the technical team at the museum proposed, by mid-2022, that our next temporary exhibition project was going to have to do with electron microscopy, and that it showed the first pieces of equipment that arrived and were used in Spain, closely

guarded at the permanent collection of the MUNCYT, I immediately gave the green light to the project and we got on with it.

Accompanied by the devoted technical team of the museum and by the two enthusiastic curators, Pedro Serena (physicist and scientific researcher of the Materials Science Institute-CSIC Madrid, and specialist in nanotechnology), and Juan de Dios Alché (biologist, scientist in charge of the Microscopy Service (CTEM) at the Experimental Station of Zaidin (EEZ-CSIC), and manager of the Department of Biochemistry, Plant Cell and Molecular Biology at the EEZ-CISC, as well as president of the Microscopy Society of Spain and expert in pollen), I learned the physical fundamentals of electron microscopy, the so called electron beam. I also learned to differentiate the TEM from the SEM devices (depending on if they are transmission or scanning devices, and on if they produce 3D images or not), and the scanning tunnelling microscopes (STM), that use a quantum effect to obtain amazing images at an atomic level.

Electron microscopy meant, in the mid- and late-20th century, the same scientific revolution that optical microscopy meant in the mid-17th century. Thanks to the electron microscopy we overcome the barriers imposed by the lenses and the photons to enter the world below 200 nm, or Abbe's limit: the world of the molecules and the viruses; and later the atomic world, developing new branches of science such as virology, palynology, nanoscience and nanotechnology.

The aim of this exhibition is to know the physical principles, the evolution, the discoveries and the uses of electron microscopy. Maybe one of the most famous quotes attributed to Sir Isaac Newton (1643-1727) to recognise the importance of the previous work of the scientists before him was: *“If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants,”* that we could replace here with: *“If I have got to see the minuscule, the microscopic, it has been on the shoulders of these giants.”*

Fernando Luis Fontes Blanco

National Museum of Science and Technology Director

Electron microscopy. Revealing the secrets of nature at an atomic scale

Juan de Dios Alché Ramírez

Pedro Amalio Serena Domingo

Preface

The intention of this article is not carrying out an exhaustive review of the origin, development, application and future of electron microscopy, but to provide enough information so the public that visits the exhibition “Giants to see the tiny. Electron microscopy” can contextualize its contents. This introductory article is accompanied by two other articles, one of them focused on the acquisition, use and impact of the first electron microscope installed in Spain (Barbero, 2025), and the other one narrating the implementation and development of electron microscopy in Spain (Alché and Serena, 2025).

The contents of this article reflect only a very small part of the scientific and technological development that has been driven by tens of thousands of people and with which a great amount of knowledge has been obtained that has allowed to expand our worldview. If we carry out a search, at Google Scholar, of the articles related to the development or the use of the different families of electron microscopes, we will find more than ten million documents. It is impossible to summarise, in a few pages, the development of one of the greatest scientific adventures in the last century, but we will try to provide a few strokes to outline the main milestones achieved.

In this article, the readers will follow a path that runs close to the exhibition: it starts with optical microscopy, it continues by going deeper into the context of the permanent and accelerated scientific revolution that we have lived since the end of the 19th century, taking a pause with the discovery of the electron, with all its scientific and technological repercussion; it continues with the invention and development of the electron microscope and its different variants, as well as with its impact on science and technology; and it ends with the challenges that all these techniques must face to keep on improving our understanding of the matter at an atomic scale.

We wish that this article extracts the essence of this long journey, with the aim of momentarily satisfying the curiosity of the reader, assessing the achievements reached by the preceding generations, and that you feel like an accomplice of the efforts carried out by the current generation to continue with the endless adventure of the creation of knowledge.

Beyond our sight

Human beings have always had a natural curiosity that induces them to grasp information, that is subtle in many cases, that allow them to describe and understand their environment and the processes that take place in it. This knowledge has used, originally, as its tools, the human sensory organs, with their great abilities on the one hand, but with its great limitations on the other hand. Of all our senses, sight is maybe the most evolved, being able to combine specialised sensors with our

nervous system, configured to harbour and interpret the huge amount of information obtained.

A part of the science has been related to our desire to know the small and invisible things at our reach, as well as the huge and distant things that make up the cosmos. In both extreme situations, the interesting objects are outside the reach of our sight. For instance, our eyes cannot discern the space between two objects if it is less than some 0.2 mm. To explore very tiny things, optical microscopes were invented, whilst telescopes were conceived to see very distant things. In both cases, the magnification of the images with the use of lenses normally made of glass was sought. The quality of the image is affected by what is called optical aberrations. Improving the first implies reducing the latter. The manufacturing of systems of lenses with controlled optical aberrations was, and still is today, a key technology for the development of advanced microscopy techniques, such as confocal microscopy, the observation of thick specimens, the super-resolution microscopy or others.

Among the first optical devices used to obtain a magnification of the images, we find the glass spheres filled with water, present in the ancient Greece and Rome, and later, the so-called “reading stones,” that were flat-convex lenses. The Modern era witnessed the emergence of the first systems made up of two (double) or more lenses, that allow to correct some aberrations, therefore improving the quality of the image seen. In this way, Anton van Leeuwenhoek’s (1632-1723, considered the “father of microbiology”) simple microscopes

were relatively abundant. They were based on glass microspheres mounted on metallic plates. The same van Leeuwenhoek was the first to inform of the discovery of microorganisms in 1676, also rediscovering red blood cells and spermatozoa. Nevertheless, the compound microscopes ended up prevailing: Galileo Galilei (1564-11642) itself devised one as an adaptation of a telescope, although Zacharias Janssen (1585-1632) is considered the inventor of the compound microscope. We must highlight the contribution of the first naturalists in the use of the microscope, as they observed live tissues under the microscope, and among which Marcello Malpighi (1628-1694), considered the father of histology, and Robert Hooke (1635-1703), author of the impressive “*Micrographia*,” published in 1665 (Hooke, 1665), stood out. In this book, uncountable samples are illustrated and studied, with the first structures named “cells,” seen on cork sheets, standing out among them. Fig. 1 shows one of the illustrations in this book.

During the 18th and 19th centuries, a co-development of microbiology and microscopy was seen. Through a continuous search of the fundamentals of life, and thanks to the observations carried out by several scientists, the cell theory was substantiated, and it would become jointly formulated years after (1839) by Theodor Schwann (1810-1882), a histologist and physiologist, and Matthias Jacob Schleiden (1804-1881), a botanist.

Seeing the microscopic world

Obtaining a magnified image of a certain sample requires the usage of beams of light formed by several rays, using lenses and mirrors, following the rules of geometrical optics. These elements divert the direction of the light beam coming from the sample with the aim of focusing it on an area, so a magnified image of the sample is obtained. Optical microscopes (from now on we will use the acronym OM to refer to them) evolved quickly from a simple conception and became greatly sophisticated pieces of equipment.

OMs have two kinds of clearly distinguishable elements: mechanical elements and optical elements, although currently electronic elements have been added (e.g. detectors, light sources, etc.) as essential components. During their first evolution, both the optical and the mechanical elements were continuously improved. Some of these changes were: 1) the use of new materials for the assembly of the base of the microscope (stands) that provided a greater stability; 2) the replacement of the movement of the optical tube by that of the stage (the support on which the sample is placed); 3) the design of binocular microscopes; 4) the nosepiece, that facilitates the change of the objective lenses in the structure of the microscopes; 5) the use of elements to control the lighting of the system (condenser lenses, field diaphragm, etc.); and 6) the use of immersion objective lenses. Fig. 2 shows the parts of a current OM.

Regarding the optical system, initially, the efforts were focused on increasing the magnification of the image and improving its quality by reducing the

optical aberrations with better designs (shape and configurations of the lenses system) and manufacturing procedures. Optical aberrations are distortions caused by an optical system that cause unclear or altered images. These aberrations are of different kinds. Among those that affect images more we have the chromatic aberration, the spherical aberration and the coma. The chromatic aberration is caused because the optical glass modifies the light beams differently depending on the different colours (related to different wavelengths) that make up white light. This is because the “optical density” of the medium (refraction index) depends on the wavelength. The spherical aberration is caused because the diversion of the trajectory of a light beam depends on if the beam goes through the central or the peripheral part of the lens. The coma is an aberration due to the incidence of beams outside of the axis, this is, those areas of the sample that are not aligned with the optical axis of the microscope. Other optical aberrations with a lesser influence in the microscopes are astigmatism, the curvature of the field and distortion. The evolution of the OMs has been conditioned by the advance in the techniques that allow to reduce these aberrations until the obtaining of systems in which the quality of the image is no longer limited by them, but by other kinds of defects, called diffractive, as we will see later.

On the other hand, ways of preparing and treating the different samples so they displayed the maximum resolution and contrast were invented and developed. Many samples could be directly observed in a “fresh”

state immediately after their collection, and without the need for additional preparations. This is the case of fluids (blood, urine), bacterial cultures, unicellular organisms, epidermis, tissue sections, etc. Frequently, the tissues and cells had to be preserved so their structure remained intact during their observation and, in some cases, after the observation. This preservation is called fixation, and it can be carried out with physical (deep-freezing, for example) or chemical methods, through the mixing of components that kill the cells but preserve their morphological and/or chemical structure. The microscopic observation of thick specimens caused the development of embedding techniques in different media, among which paraffin and the obtention of thin sections thanks to the design of auxiliary equipment, such as microtomes, stand out. The samples that were to be observed started to be treated with different products to increase their contrast. In particular, dyes and/or substances that had the ability to bind more or less specifically to tissue structures providing them with colour and contrast were used.

All these improvements in the design of optical and mechanical systems, as well as in the preparation of the samples, seemed to offer an unlimited development of optical microscopy to unconceivable levels, although the conclusion was reached that the ability to detect small details through systems of lenses had unsurmountable limitations. The concept of the resolving power (RP), or the optical resolution of a system, defined as its ability to distinguish two points or objects in the image, was thus born. This definition was proposed by

Ernst K. Abbe (1840-1905) in its theory on the limits of resolution, published in 1873. Abbe's theory was based on the ondulatory conception of light, going beyond the models of the propagation of beams of geometrical optics. The light waves interfere between them, causing variations in the intensity of light on the image, this reducing the ability to form images true to the sample. Also, these interferences increase when the propagation of light is hampered by edges or other kinds of structures with a similar size to the wavelength, this being a phenomenon called diffraction. Abbe's theory relates, through a formula, the resolving power (RP) to the wavelength of the source of light used (λ) and the numerical aperture (NA) of the objective lens used. The numerical aperture is, in turn, a dimensionless parameter directly proportional to the refraction index of the material the lens is made of and the sine of the maximum acceptance angle of the light beam that may enter or exit the lens. Fig. 3 shows the different variables that determine the resolving power.

Therefore, the OM has fundamental limitations due to the wavelength of visible light, with values between 400 and 700 nm, and the immersion medium used, that allows to control the numerical aperture. Ideally, the resolving power of an OM can reach 200 nm. This implies that details with a size below 200 nm cannot be seen with an OM, this imposing an insurmountable limit to optical microscopy.

The splendour of optical microscopy: the example of Santiago Ramón y Cajal

Optical microscopy reached its peak during the last third of the 19th century and the first half of the 20th century. In this period other important technical contributions were also developed that included the invention of methods to increase the contrast, especially in the case of biological samples, generally transparent and with a great water content. Also, by the end of the 19th century, the petrographic microscope, designed by Camille S. Nachet (1801-1881), was built. Once in the 20th century, the phase-contrast microscopy, invented by Frits Zernike (1888-1966), the dark field condenser, invented by Henry W. F. Siedenhoff (1872-1940), and the differential interference contrast microscopy (DIC), designed by Georges Nomarski (1919-1997), were born.

Among the prominent Spanish researchers of this time, Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) stands out. He obtained the professorship of Descriptive Anatomy at the Faculty of Medicine of Valencia in 1882, and later he held professorships at the University of Barcelona (1887) and at the Central University of Madrid (1892). Cajal systematized the protocol of the silver impregnation ("*reazione nera*"), initially developed by Camillo Golgi (1843-1926), for the study of the nervous system, describing its structure accurately and showing the independence of its cell elements (later called neurons). Cajal studied the nervous system of many vertebrates, discovering the dendrites of the pyramidal neurons and postulating the existence of the synaptic discontinuity. To the quality of Cajal's

research we must add his artistic talent (De Felipe, 2005), that left us many detailed illustrations of his studies, as shown in Fig. 4.

Based on Cajal's observations and interpretations, the neuron theory was formulated, as opposed to the reticular theory defended by Golgi. Thanks to this theory, Cajal was awarded the Nobel Prize in 1906, shared with Golgi. By then, Cajal was one of the undisputed leaders of the Spanish science, creating a histology and neurology school that has had an influence to this day. The life and works of this eminent researcher have been gathered in many biographies (Larriba, 2020; Cánovas, 2021; Sanz Serrulla, 2022).

Besides his proficiency as a researcher, Cajal stood out for is talent as a master in the research activities, and as a science communicator. His importance in the Spanish science goes beyond his research and discoveries, because he was in charge of the Council for the Extension of Scientific Studies and Research (Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, JAE) since its inception. This institution was key in the process of the joining of Spain to the scientific and technological trends of the more advanced countries. While leading the JAE, Cajal drove the creation of a system of pensions (grants) that allowed to extend the training of promising or consolidated researchers in prestigious foreign research groups, creating an extensive network of scientific connections. When these researchers returned to Spain, they rejoined newly created research institutes, therefore nurturing the Spanish research system. This matter will be sub-

sequently addressed again in the third curatorial article in this catalogue (Alché and Serena, 2025).

We must highlight that year 2022 was declared, by the Government of Spain, the "Ramón y Cajal Research Year." It was a special event of public interest that will last until the 31st of May 2025, and that commemorates the most important scientific personality in the history of Spain.

The electron enters the stage

Throughout the 18th and the 19th century, countless advances happened in all the scientific disciplines, this giving place, in many cases, to innovative technological developments. Just to quote a few examples, we can mention the establishment of the laws of chemistry, the proposal of the periodic table of elements, the cell theory or the formulation of the theory of electromagnetism. Science and technology started to shape a new society.

One of these advances, maybe a striking one, happened in 1850, when Heinrich Geissler (1815-1879), a German physicist and an expert in the handling of glass, manufactured a tube with this material (called discharge tube), inside which a potential difference (voltage) could be applied between two electrodes. When applying high voltages to tubes containing gases at a low pressure (rarefied gases), conductive liquids or ionizable metals, the emission of a light with a characteristic colour for each substance was seen. Breaking up this light thanks to a prism or a diffraction grating, the emission spectrum of the substance was made visible, this

allowing its identification. This finding entailed the start of spectroscopy, an essential tool in modern chemistry.

The glass tubes also started to be used in other kinds of experiments. In 1858, the cathode rays were discovered by the German scientist Julius Plücker (1801-1868), who coined this name for the strange radiation emitted by the cathode of a discharge tube, that could be seen when in that tube the best possible vacuum was attained. Later, the English chemist William Crookes (1832-1919) developed the tubes named after him, designed to study this new radiation (Fig. 5). At that time, the work on cathode rays by the German physicist Johann W. Hittorf (1824-1914) and the Hungarian Philipp E. A. von Lenard (1862-1947) stood out. The latter was awarded the Nobel Prize in Physics in 1905. In 1895, the X-rays were discovered, also using vacuum tubes, by the German physicist Wilhelm C. Roentgen (1845-1923), who was awarded the Nobel Prize in Physics in 1901. It was in 1897 when the British physicist Joseph John Thomson (1856-1940) identified the nature of cathode rays, establishing that they consisted of negatively charged very light particles. These particles were called, soon after, electrons. Thomson was awarded, in 1906, the Nobel Prize in Physics (Sánchez Ron, 1997). The glass tubes, so simple in their conception, were essential for carrying out enormously important scientific breakthroughs.

The new findings, such as the spectral emission or the electron, had to be incorporated into the atomic models of matter. Although the atomic theory dates back to Classic Greece, its modern version took shape

over the 19th and 20th centuries, and it was followed by increasingly sophisticated atomic models such as that proposed by the English chemist John Dalton (1766-1844), that was formulated by Thomson itself, or the “planetary” model of the New Zealander physicist Ernest Rutherford (1871-1937) (Challoner, 2019). In all these models, the atoms were conceived as so minuscule entities that they escaped the capacity of observation with OMs. Nevertheless, their presence was detectable indirectly, as proposed in 1905 by the German physicist Albert Einstein (1879-1955) in his explanation of the Brownian motion.

Whilst the spectrums, X-rays, cathode rays and electrons gained prominence, a couple of scientific revolutions were beginning to be conceived that arose from the need to explain some phenomena that did not fit in the classic framework of science. In 1905, Einstein formulated the theory of restricted or special relativity, with the counterintuitive hypothesis of the constancy of the speed of light in all the inertial frames of reference, this requiring a reinterpretation of space and time, as well as the equivalence between mass and energy. On the other hand, with a wider development throughout time, quantum mechanics appeared with the pioneering work of the German scientist Max Planck (1858-1947) and of Einstein himself, and it reached its peak with the formulations developed by Werner Heisenberg (1901-1976) and Erwin Schrödinger (1887-1967) (Sánchez Ron, 2000; Miret, 2015).

Quantum mechanics has a surprising phenomenology related to it, such as the “tunnel effect,” that explains

how a particle can overcome a potential difference barrier when it does not have enough energy to do it from the classic viewpoint. Another remarkable aspect of quantum mechanics is the wave-particle duality principle, postulated in 1924 by Louis De Broglie (1892-1987), that establishes that the particles of matter have, simultaneously, properties that are characteristic of particles and waves. In this way, a particle with a linear momentum p (classically obtained by multiplying the mass of the particle m by its velocity v) has, associated, a matter wave whose wavelength is $\lambda = h/p$, h being Planck's constant, that has an extremely low value: $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s. Einstein, in his work regarding the interaction between light and matter, had already proposed the existence of photons as corpuscular entities linked to electromagnetic waves, but De Broglie's hypothesis went beyond, associating matter waves to any particle. His postulate was confirmed in 1927 by the American physicists Clinton J. Davisson (1881-1958) and Lester H. Germer (1896-1971). One of the consequences of the wave-particle duality postulate is the possibility of designing machines that use the undulating properties of matter instead of using electromagnetic waves such as light or X-rays.

The invention of the electron microscope

From a technological perspective, the emergence of electricity and the possibility of manipulating electron flows caused a radical change in the life of human beings. Besides using electric currents to transport energy in order to illuminate places and move machines

and vehicles, the handling of electrons in the cathode-ray tubes also lead to the discipline that was later known as electronics, whose vertiginous evolution, going from the vacuum devices to those based on semiconductors, has allowed us to create the digital society in which we live.

Electronics based on vacuum devices (vacuum electronics) was developed over a few decades, filled with milestones and feats. In 1883, the German physicist Heinrich R. Hertz (1857-1894) managed to modify the direction of cathode rays with electric and magnetic fields. Later, the German physicist Emil Johann Wiechert (1861-1928) managed to focalise the electron beams with the use of an axial magnetic field. In turn, the German physicist Karl Ferdinand Braun (1850-1918) developed, in 1897, a system for the visualization of electron beams with magnetic deflection. His invention, called "Braun tube" (CRT, or Cathode-Ray Tube), was the origin of the oscilloscopes and of the cathode-ray monitors. Braun was awarded the Nobel Prize in Physics in 1909.

At the beginning of the 20th century, in 1903, the German physicist Arthur Wehnelt (1871-1944) developed a device (Wehnelt cylinder) with which to build electron guns, and a year later he developed metallic cathodes coated with oxides that produced powerful electron emissions, broadening the spectrum of their possible technological applications. In 1904, the British engineer John A. Fleming (1848-1945) registered the patent of a diode or thermionic valve that could work as a corrector: this is, a device that transforms alternating current into direct current. Two years later, Lee de Forest (1873-

1961) designed the triode electronic valves. Cathodes, electron guns, phosphorous screens, triodes, rectifiers, pentodes, etc. allowed the design and manufacture of numerous pieces of equipment and machines throughout the first half of the 20th century, such as radio transmitters and receivers, signal amplifiers, oscilloscopes, photovoltaic cells, televisions or the first computers (Thrower, 2005). Humanity entered the electronics era.

It is interesting to point out the relevance that Germany had in many of these developments, due to the outstanding role that its solid industrial sector had (and still has). In particular, many advancements in physics and electronics in those times were stimulated and quickly assimilated by companies such as Siemens & Halske or Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), established in Berlin in 1847 and 1883, respectively.

In 1926, in this context of co-development of science and technology, Hans Busch (1884-1973) demonstrated, theoretically, the possibility of focalizing electron beams on very small areas by using magnetic lenses made of coils. In this way, an analogy was established between optical lenses and their effect on the light beams, and electromagnetic lenses (systems that can create electric and/or magnetic fields) and their effect on electron beams. At the Technical University of Berlin, Ernst Ruska (1906-1988), a young physicist that joined the team of the engineer Max Knoll (1897-1969), started working on the design of highly sensitive oscilloscopes with a quick response. Knoll and Ruska, after knowing Busch's ideas, decided to develop lenses capable of

concentrating electron beams for their use in high-performance oscilloscopes. Nevertheless, the project soon was reoriented towards the manufacturing of a device that used the light and manageable electrons to "illuminate" a sample and, therefore obtain an enlargement of the image. Ruska and Knoll built, in 1931, a piece of equipment with which they obtained the first magnified images of some grids. Fig. 6 shows an image of both scientists next to this device. This machine, that did not attain the resolution of an OM yet, is considered the first electron microscope.

Meanwhile, Reinhold Rüdenberg (1883-1961), who worked as an engineer at Siemens-Schuckert, contemplated the manufacturing of a microscope based on electrostatic lenses, an invention that he registered in 1932 in the United States Patent Office. Nevertheless, it seems that he never managed to build an operational device. A year later, Ruska and Knoll assembled their second electron microscope, with three magnetic lenses, more complex than the first one, with which they overcame the resolving power of the OMs.

The academic world entered a stage of excitement. In Brussels, the Hungarian physicist Ladislaus Laszlo Marton (1901-1979) built, in 1932, an electron microscope with which two years later he obtained the first micrograph of a plant tissue. In 1934, the German Walter Kohl, whilst on a visiting scholarship at the University of Toronto (Canada), designed an electron microscope prototype. A year later, at the same University, Cecil Hall built another device with an electrostatic lens, this being the precursor of the device

developed in 1939 by Eli Franklin Burton's (1879-1948) team at the same institution. In 1935, Paul Anderson and Kenneth Fitzsimmons, at the Washington State University (USA), designed another electron microscope prototype, although in 1936 their project came to an end due to the lack of funding. In 1935, Knoll himself (that had joined the Telefunken company whilst keeping an academic post at the Technical University of Berlin), proposed the design of a device that allowed to make scans with the electron beam on the sample, getting ahead of the building, in 1937, of a microscope with similar features by Manfred von Ardenne (1907-1997), who managed his own private laboratory in Berlin. At that time, Louis C. Martin, from the Imperial College of London, designed the first British microscope. To this list of people, we could add the names of other pioneers in Japan, France, Sweden or Italy. The advancements achieved between 1933 and 1937 correspond to a period of incubation of the technique, that reflects the euphoria that disruptive discoveries bring about in the scientific community (van Gorkom et al., 2018).

Incidentally, we will mention that the first electron microscopes were called hypermicroscopes, ultramicroscopes or supermicroscopes. Finally, the term "electron microscope" prevailed, and it englobes both the devices based on the transmission of electrons through the sample and those based on the scanning of an electron beam across the surface of the sample. In this article we will use the term EM to refer to electron microscopes in general. Nevertheless, we will also use the acronyms TEM (Transmission Electron Microscope)

and SEM (Scanning Electron Microscope), resorting to the jargon used in the laboratories.

The powerful electronic equipment companies followed closely all the breakthroughs made at different universities, because EMs represented a great opportunity for their businesses. In 1937, Siemens hired Ruska, his brother Helmut Ruska (1908-1973), with a medical background, and Bodo von Borries (1905-1956), collaborator of Ruska since the beginning of the development of the EM. The goal of this group was to boost the use of this technique in biology and medicine. In this way, Siemens launched, in 1939, the first commercial TEM in the world, with an astonishing resolving power of 10 nm and a 14,000x magnification, approximately. In 1940, the American company Radio Corporation of America (RCA), released an EM thanks to the work of the engineers J. Miller and V. K. Zworykin (1888-1982). It must be underlined that Zworykin was behind many inventions that allowed the development of the television. That same year, the companies Philips (The Netherlands) and Metropolitan Vickers (United Kingdom) introduced their EM commercial models. Along the 1940s, the German company AEG and the Japanese company JEOL launched their own devices. In 1951, the company Tesla, established in the city of Brno, in the former Czechoslovakia, introduced a new product to the market that soon became a benchmark in the countries of the Soviet Bloc.

During the 1940s and 1950s, there was a wild race to develop and release the EM, incorporating ideas

and developments from the academic and industrial world, providing, therefore, the devices with continuous improvements, this allowing them to improve their resolving power and their analytical abilities. Fig. 6 shows the evolution of the resolving power for different microscopy techniques, with the jump seen in the 1940s being worth mentioning. In 1946, James Hillier (1915–2007) reached the amazing resolution of 1 nm, prompting the idea that the atomic resolution was within reach.

How does an electron microscope work?

An EM has a series of basic structural elements, although given that there are several families of devices, they show variations regarding their architecture and functioning (Thermofisher, 2020). In this section we will focus on the most common EMs: TEM and SEM, previously mentioned. The diagrams of both pieces of equipment are shown in Figs. 8 and 9, respectively.

The tower or column of an EM consists of a robust steel chamber in which the remaining components of the device are located. A vacuum (generally a high-intensity vacuum) is created in the column with the help of pumps (diffusion, turbomolecular) usually mounted in a cascade distribution. The electrons are emitted by a filament that can have different shapes and compositions (tungsten, lanthanum hexaboride (LaB6) or cerium), and they are accelerated by a voltage applied between the anode and the cathode that can range from a few kV to some 200 kV (although in some devices, more than 1 MV can be applied). The

small mass of the electrons favours that they reach high velocities (they can reach a relevant fraction of the speed of light) when accelerated, so the so-called relativist effects must be borne in mind. These high velocities lead to extremely small wavelengths of the electrons (as a consequence of De Broglie's principle), this providing an exceptional theoretical resolving power according to Abbe's criterion (see Fig. 3.)

The generated electron beam is modified by the action of different lenses, that can be electrostatic or magnetic, the latter being the most widespread. The first lens (condenser lens) focuses the electron beam on the sample in the same way as the condenser lens in an optical microscope. The sample, in the case of a TEM, is located in a circular structure with a standardised diameter of 3.05 mm, it has the shape of a grid, and it is made of different materials (carbon, nickel, gold, plastic...) depending on the application or the kind of sample to be observed. In the case of a SEM, the sample is placed on a stand (stage) with a greater size. In an EM, the sample is placed on a slide that allows to display different regions of the sample with different orientations with respect to the incident electron beam. In more sophisticated devices, the sample can be cooled, heated, deformed, subjected to electric or magnetic fields, be locally surrounded by small concentrations of different kinds of gases, etc.

In a TEM, the electron beam, after going through the sample, is modified by another group of lenses (projector lenses) that amplify the transmitted beam on a fluorescent screen, a photographic plate or other kind

of detectors (scintillators, CCDs or CMOS), that generate and/or register the magnified image of the sample.

In a SEM we also find a vacuum generating system, an electron emitter and condenser lenses. Nevertheless, in this case, the electrons are greatly focused, although using a lower accelerating voltage. The lens system gets the beam to hit on a very small area (approximately 1 mm). In this area, a complex interaction of the electrons with the sample takes place (Egerton, 2005), this causing that some electrons get lost inside the sample, whilst others are reflected in different directions. The incident beam is also able to pull electrons out from the atoms located in the most superficial part of the sample. These electrons, called “secondary” electrons, have less energy than those from the incident electron beam, and if they get to escape the sample, they are collected by a sophisticated detection system. The intensity of the signal provided by the secondary electrons in each sampled point is related to the topography and the composition of the sample. In this way, by carrying out an examination of the sample with scans with the electron beam, it is possible to reconstruct its 3D topography.

When using an EM, we wish to obtain a high-resolution image, so all the system must be very controlled, removing mechanical vibrations, minimising fluctuations of the electron beam, as well as of the fields generated by the electrostatic or magnetic lenses, etc. In fact, the resolving power of these microscopes is not conditioned by the wavelength of the electrons, but by the aberrations of the electrostatic and magnetic lenses,

as well as by the mentioned vibrations and fluctuations. The electromagnetic lenses are made up of electrodes and coils that cause certain distortions on the beam, that become aberrations that must be corrected with sophisticated techniques, just like it happens with optical lenses. The analogy between the conventional optics and the science that studies the movement of electrons in the presence of electrostatic and magnetic fields is so great that in the first decades of the 20th century, the term “electron optics” was coined to refer to this branch of physics.

The preparation of the samples for their observation in the EMs is one of the most critical steps, this limiting, in most of the cases, the resolution and analytical ability of these instruments. In the case of the TEMs, this is a quite complex issue, because electrons cannot go through a thickness that exceeds a few hundreds of nanometres. The preparation of the samples for their observation requires the use ultramicrotomy techniques (that obtain transversal slices of the sample with minuscule thicknesses) or slimming techniques (with the wearing down, refining, ion milling, etc.). On the other hand, the sample cannot contain water nor emit (desorb) gases that contaminate the inside of the column. Also, like it happens with the OM, it is possible to treat the samples with certain chemical elements to improve the contrast in specific areas of interest. They are, in general, salts and elements with a high electron density and heavy metals (uranium, lead, lanthanum...). In some cases, it is also possible to obtain a replica of the sample (with its coating with metals), therefore

reproducing its topography, this replica being then the one studied with the TEM.

In the case of the SEM, a previous preparation of the samples through their dehydration and/or the metallisation of their surface is also necessary, in many cases, and therefore the topography observed actually matches the thin layer that coats the specimen. The most common elements used to carry out the coating are gold, platinum and carbon. This coating also increases the conductivity of the sample, avoiding the hazards due to the accumulation of charges or the scarce thermal dissipation, that are phenomena that cause alterations in the images of the samples.

The use of the EMs requires great qualifications, and it is necessary to understand how they work, apply the appropriate techniques to prepare different kinds of samples, and develop expertise (the famous “eye of the microscopist”) to interpret the fascinating images obtained and therefore make the most of their potential.

The rise of the electron microscopy

Since their invention, EMs had a very quick development, due to their very promising features (Reyes Gasga, 2020; Mestres Ventura, 2023). After the solid establishment of the companies Siemens and RCA in the early 1940s, both had to adapt to the agitated period of the Second World War. Whilst RCA was able to develop its microscopes without great setbacks, Siemens had to do it whilst its premises suffered severe bombings. This allowed RCA to recover part of the advantage that Siemens had

initially. During those years, other companies dedicated to the manufacture of EMs, such as Vickers in the United Kingdom, Tesla in Czechoslovakia or JEOL in Japan, already mentioned in the previous section, emerged. This proves the great interest that these devices arose because of their spectacular resolving power and the enormous magnification power. In collaboration with local research centres or conducting their own developments, these companies started to improve the designs of the devices and to incorporate additional instruments for the characterization of the samples that worked in the microscope itself. At the same time, new methods for the preparation of samples were developed so the technique spread to different areas of research.

We must mention that the access to these pieces of equipment was expensive, both because of their price and due to the need of proper premises, their maintenance and because they had to have highly qualified staff both regarding their handling and the preparation of the samples. Nevertheless, the potential market for EMs was huge, so hundreds of universities, research centres and companies started to purchase these instruments to increase their capacities and improve their competitiveness.

If we look at the time period covered by the exhibition (from the 1940s to the 1980s), among the improvements that were added to the EMs we can underline (Haguenau et al., 2003): i) the gradual increase in the acceleration potential with the aim of reducing the wavelength of the electrons and therefore attain a greater resolving power; ii) the increase in the number of electromagnetic

lenses; iii) the more efficient design of these lenses to avoid aberrations or uncontrolled fluctuations of the fields; iv) the improvement of the stability of the electron beam due to the perfectioning of the power sources and the control electronics; and v) the use of the so-called bright and dark field modes to improve the contrast of the sample.

Other developments that were gradually added to the EMs include the cathodoluminescence (CL), based on the emission of a characteristic light by some materials when an electron beam hits them, this allowing, in some cases, to determine the composition of the material. In 1943 the electron energy loss spectroscopy (EELS) appeared. It is a technique that provides information of the sample from the way in which the electrons of the beam that hit the sample decelerate inside it. Systems were added that can study the electron diffraction (EF), that allows to obtain information on periodic structures from the interference pattern of the electrons transmitted in different directions after going through the sample, this allowing to infer the organized or disorganized structure of the sample and, the former case, the dimensions of the unit cell that repeats itself to form the periodic structure.

Another analytical technique incorporated to the EMs was the energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). When the high-energy electrons from the main beam hit the sample, they cause the extraction of electrons from the deepest energy layers of some atoms. The gap created is occupied by another electron of the same atom, and during this transition, energy in the

form of a high-energy electromagnetic wave (X-rays) is liberated. The analysis of these X-rays allows to know the composition of the sample.

A relevant milestone in the development of the TEMs was the introduction, in 1951, of the LaB6 as a material for the emission of electrons, attaining an important improvement in the density of the emitted current. Regarding the improvement of the detection systems, in 1960 the scintillation counter was invented.

It has been previously mentioned that the SEM was devised almost at the same time as the TEM. Nevertheless, both the detection of secondary electrons and the interpretation of the signals received and their transformation into 3D topographies posed difficulties that took some time to solve. Also, the control of the thin beam that scanned the sample required sophisticated control electronics. In 1965, the Cambridge Scientific Instruments company introduced the Stereoscan 1 SEM, the first commercial device of this kind. Its ability to obtain 3D images of the topography of the sample was key to drive this technique, that spread quickly globally, so from those years it was common that a microscopy service had a TM as well as a SEM. In 1980, the commercial SEM reached a resolution of 2 nm.

The evolution of the EMs until 1979 is magnificently represented in Fig. 10, that shows a poster of the company JEOL. Nevertheless, in the 1980s there was a significant change in these devices. With the arrival of electronics based on semiconductors, the integrated circuits replaced the vacuum valves used in the EMs. In

1986, the first EMs controlled by computers appeared, and this meant a new way of working with these pieces of equipment. Back then, the consoles full of buttons, knobs and indicators started to disappear, and they were replaced by virtual consoles that appeared in the screen of a computer with which the interaction was first with a keyboard and later with a mouse.

So far, we have described the evolution of the elements found in an EM, but in parallel to this evolution, the use of these devices spread to different disciplines. Initially, medicine seemed to be the field in which electron microscopy could represent a qualitative leap in the characterisation of tissues. Histology or anatomical pathology has reached a considerable development with the OM, but the arrival of the EM entailed a quantitative leap in these disciplines. It has already been mentioned that H. Ruska, E. Ruska's brother, with training in biology and medicine, decidedly bet on the development of the EM because he thought that medicine would be a breeding ground for this technique, and this is the reason why he visited universities and companies in Germany promoting this technique. H. Ruska himself carried out significant observations of viruses and other biological entities using the first EMs. With these devices it was possible to relate the structure at a nanometric or molecular level to the functionality of the components of the cells, bacteria or viruses, knowing the way in which some diseases appear and develop, study the action of drugs, etc. Among the most striking contributions we can find, without a doubt, the observations of the neuronal synapse. With time, the applications in medicine as a

diagnostic tool lost importance due to the difficulty in the preparation of the samples and the emergence of more efficient diagnostic tools. Nevertheless, its use to characterise cell ultrastructures and understand their functionality has survived to this day.

Regarding the influence of electron microscopy in fields like physics or chemistry, we must say that it was scarce before the Second World War because of the priority that these disciplines gave to subjects such as radioactivity, the structure of matter, quantum mechanics, nuclear physics, cosmic radiations, etc. Nevertheless, after the end of the war, the great development in the science of materials in the first place, followed by that of solid-state electronics took place. In both fields, electron microscopy became an indispensable technique for characterisation. As the synthesis and characterization techniques were perfected, we started to understand and control the structure of the matter at a nanometric scale, this paving the way for the arrival of the discipline that we now know as nanotechnology. We will talk about it in the next section.

To end this section, we must mention that as electron microscopy expanded, communities of developers and users became established, and they organized themselves as national and international microscopy societies, celebrating meetings and scientific conferences where there was an exchange of ideas and methodologies. We must mention that sometimes, these exchanges were limited because of the confidentiality kept by the companies in this sector. Anyhow, these associations were key for the creation of a scientific community that

has had a crucial role in the scientific progress since the mid-20th century.

The scanning tunneling microscope

Since the 1960s, we saw the start in the studies in more detail of the rich quantum properties of the electron transport thanks to the ability to build devices with high-precision techniques that were also being used in the emergent industry of microelectronics. One of the interesting topics was knowing the properties of the transmission of electrons through very small constrictions, because interesting quantum effects appear due to the confinement suffered by the electrons. Another subject to which attention was paid was the study of the transmission of electrons through energy barriers with the surprising tunnel effect that we had already talked about. To get to see this effect, fixed geometry devices were built in which two conductive surfaces were kept at a distance of a few tenths of a nanometre, separated by an isolating material or a vacuum. This separation generated a barrier of potential that could not be overcome by an electron in the terms foreseen by the classic mechanics, but that could do so in the terms of quantum mechanics with a certain probability of transmission that depended on factors such as the distance between the electrodes and the height of the barrier.

In the early 1980s, the researchers Heinrich Rohrer (1933-2013) and Gerd Binnig (1947-), from the laboratory of the company IBM located in Rüschlikon, near Zurich (Switzerland), designed a sophisticated variable

geometry device with which they tried to measure the tunnel current that appears between two electrodes, one of them being a very sharp metallic tip that could be moved over the other electrode, that consisted of a surface of a conductive material. In this instrument, the tip was moved close to the surface in a controlled way without coming into contact with it, whilst an electrostatic potential difference was applied between both. In this way, for separations of a few tenths of a nanometre, the emergence of the so-called “tunnelling current” (a weak flow of electrons that went from one electrode to the other by means of the tunnel effect) was seen.

These instruments were able to move the tip to the sample in a stable way by means of mechanical systems made with piezoelectric materials (deformable when subjected to potential differences). To achieve this stability, they had to be isolated from all kinds of mechanical vibrations, this being attained with a complex shock-absorbing system designed with magnets and springs. Another key factor was the use of a vacuum to avoid that atoms or molecules that could completely alter the measurements taken ended between the tip and the sample. Finally, the functioning of the system required of a very sensitive electronic equipment able to detect minute currents.

At one point, the possibility of using this instrument to measure the tunnel current at different points of a sample whilst the tip scanned its surface was conceived, using positioning systems also based on the piezoelectric materials previously mentioned. In this

way, the tunnelling current measured at each point could be useful to acquire information on the topography of the surface, because this current is very sensitive to, among other factors, the separation between the tip and the sample. In this way, in 1981, a device, currently known as Tunnelling Effect Microscope, *Scanning Tunnelling Microscope* or STM was built (Binnig and Rohrer, 1987). Fig. 11 shows the diagram of an STM and the generation of the topographic image of a sample with successive scans.

With this equipment, images with a great resolution of conductive surfaces were starting to be obtained, because it was possible to clearly identify the positions of the atoms. This technique meant a small revolution in the microscopy world because it gave up the use of high-energy electron beams, typical of the TEMs or the SEMs, and instead of that, it used much smaller electron currents. One can somehow think that the complex system found in the column of an EM, made up of a transmitter, the acceleration electrodes and several electrostatic or magnetic lenses, was replaced by a tip that can take the emission of electrons very near the surface of the sample, working at much lower voltages. It is said that the STM is a “close-field” system.

The feat of obtaining images with an atomic resolution in a relatively simple and replicable way was quickly acknowledged with the awarding of the 1986 Nobel Prize in Physics to Rohrer and Binnig, shared with Ruska for his invention of the EM. By the way, whilst Rohrer y Binnig obtained this award in less than five years after their invention, Ruska had to wait for more than half

a century. Sometimes, one must wait for a lifetime to receive such a prestigious prize, or you never receive it, as it happened in the case of Knoll, the co-inventor of the EM.

Since its invention, the STM evolved rapidly because its inventors shared the secrets of the technique with numerous research groups around the world (Asenjo et al., 2022). In this way, this device incorporated several improvements: a greater current stability, more effective sensors, more compact designs that avoided the mechanical noises, more accurate control systems of the relative position between the tip and the sample, the production of sharper tips, software for the obtaining and analysis of images, control of some variables such as the temperature, magnetic fields, chemical environment of the sample, etc. At the same time, many companies started to release STM devices. The community dedicated to the design and use of these instruments grew rapidly.

One of the most remarkable feats of the STM was that attained in 1990 by Donald M. Eigler (1953-) and Erhard K. Schweizer, researchers at IBM's Almaden Research Center (USA), when they wrote the logo of their company with 35 xenon atoms using the tip of a STM as “nanotweezers” with which to see and move atoms (Eigler and Schweizer, 1990). This kind of studies opened up new research fields thanks to the possibility of handling atoms individually. Fig. 12 shows an example of an image obtained thanks to the manipulation of atoms using a STM.

The development of tools that provided the ability to see and move atoms individually had been anticipated in 1959 by Richard Feynman (1918-1988), who expounded, in his famous conference “There’s Plenty of Room at the Bottom,” that these abilities, together with other advancements in the synthesis and characterisation of materials, would trigger a revolution in the way that materials and devices were to be produced (Feynman, 1960). This already mentioned revolution has given place to the discipline that we call nanotechnology (Serena, 2021), that has been possible, in part, thanks to the contribution of the different microscopy techniques developed in the 20th century (Rivera and Arenas, 2020).

Present and future of electron microscopy

Before delving into what has happened with electron microscopy in more recent times, we must mention that the use of OMs, far from dropping has continued growing thanks to the advances that these instruments have experienced by incorporating very powerful methodologies, such as phase contrast, fluorescence, the emission of two or more photons, super-resolution, etc. OMs still are essential in the biological and medical areas, complementing many other techniques with the aim of reaching a complete characterisation of tissues, cells, proteins, chromosomes, DNA, etc.

As pointed out, the exhibition takes a quick look at a part of the history of electron microscopy, showing instruments produced or installed between the 1940s and the 1980s. This period saw the considerable

improvement of the devices, the development of the related characterisation techniques and the optimisation of the sample preparation protocols. During this time, some leading companies in the manufacturing of EMs left the market, as it surprisingly happened with Siemens or RCA; others like Philips (later FEI) or JEOL grew stronger, and some new ones, such as Hitachi, ThermoFisher or TESCAN came into play. These dynamics are common in industries in which technological competitiveness is extreme.

Since the mid-1980s, more than four decades have gone by. This is a more than considerable time for any technology. We only have to think in what has happened with pieces of equipment that we usually use, such as phones, television screens or cars. Electron microscopy has not been an exception, and although the basics and the essential structure of the TEM and the SEM have not varied from their invention, both techniques have undergone significant advancements with the aim of improving the resolution and quality of the images, improve the range of materials and specimens studied, and facilitate their operation (ThermoFisher, 2022).

As already mentioned, one of the most obvious changes, initiated by the mid-1980s, has been the incorporation of digital technologies in the control of the stability of the electromagnetic lenses, the automation of the functioning of the devices, and the digitalisation of the capturing and treatment of the images of the samples. In the specific case of the SEM, digitalisation has been accompanied the release of compact and small desktop devices, making this

technique available to small laboratories and lecture rooms. By the way: this kind of easy-to-use desktop microscope was anticipated in the cult movie “Blade Runner,” directed by Ridley Scott in 1982.

We must not forget that digital technologies also allow to bring together and combine adequately all the structural and compositional information acquired by an EM with that coming from other microscopic and analytical techniques, providing a global vision of the studied system. The techniques that allow this efficient combination of data are called “correlative.” More recently, the breakthroughs in artificial intelligence (AI) are beginning to be incorporated into electron microscopy, and this allows to analyse more efficiently the huge amount of data acquired or to automatically explore areas of interest in the sample, just to give a couple of examples.

Other improvements that have been incorporated into EMs have been crucial to enhance the quality of the images and increase the resolving power. We can mention the development of new detectors that are able to collect electrons with a well-defined range of energy or that have been dispersed in a certain direction. These advancements, together with an adequate design of the electromagnetic lenses and the treatment of images with powerful computer programmes have led to the High Resolution TEMs (HRTEM). With this technique, a resolving power of 50 pm (0.05 nm!) has been reached, and therefore it is possible to obtain clear images of atoms. This powerful technique allows, for instance, to carry out a tomographic study of a particle

consisting of tens of thousands of atoms, establishing the position and the chemical species of each of its atoms (Calderón, 2020).

In other cases, the improvements of the TEMs or the SEMs have been attained thanks to sophisticated technical modifications with which to change the environmental conditions of the sample by controlling its temperature, applying magnetic fields or even injecting small amounts of gas in its surroundings, as previously mentioned. In this way, it is possible to know, for example, how a material behaves under conditions that are very similar to its operation mode. These modifications have given rise to the E-TEM or E-SEM, the E standing for environmental.

In other instances, it is not only possible to change the conditions of the material, but also to cause changes in its structure through a local ion bombardment that, thanks to their greater mass become real chisels that can carve, cut or drill the sample at a nanometric scale. This technique is called FIB (Focussed Ion Beam). In this case, the same piece of equipment incorporates systems that can generate and handle electron and ion beams. In this way, the sample can be observed whilst it is modified in a controlled way. These devices with a double beam are known as DUAL Beam, and they can be FIB-TEM or FIB-SEM.

In the sphere of the STMs, it is compulsory to mention that the way in which they work inspired the development of a new family of instruments that are jointly called SPMs (Scanning Probe Microscopy) (Asenjo et al.,

2022). Maybe, the best-known is the AFM (Atomic Force Microscope). With this incredible technique, the minuscule forces with different origins (magnetic, electrostatic, van der Waals...) that are exerted onto a tip placed on the point end of a knob when this tip scans the surface of a sample are measured. By measuring these forces in each point of the surface, we obtain a topographic map of the surface that can reach an atomic resolution. These tools have managed to see the diffuse electron clouds associated to the atomic and molecular orbitals. These techniques allow us to work with different temperature ranges, while the sample can be subject to magnetic or electrostatic fields, deformations, etc.

Maybe, one of the advantages of the SPM techniques is the ability to work in liquid environments, allowing us to observe the live biological material while it performs its functions or ceases to do so due to a disease. This has made the SPM devices increasingly common in biomedicine or biotechnology laboratories. An example of their use in the field of biomedicine is shown in Fig. 13, in which we see a red blood cell infected with malaria. This image, in which an erythrocyte is represented with golden tonalities, allows us to illustrate the fact that both with EMs, STMs or with the STM techniques, the registered data (electron intensity, electric currents, forces) are used to create an image with a colour palette chosen according to the researcher's taste with the aim of highlighting those details that they wish to emphasise.

To finish with the review of the recent breakthroughs in electron microscopy in the last four decades, we must mention the electron transmission cryogenic microscopy technique, usually shortened to CryoTEM. With this technique, the sample that we wish to study is kept at low temperatures with the aim of reducing the fluctuations in the movements of the atoms, therefore considerably improving the definition and resolution of the images. To carry out the observations, highly efficient detectors (like CMOS) are used, and it is also necessary to apply a powerful statistical treatment on the observations performed on numerous samples to be able to reconstruct a 3D image representative of the sample.

With this technique, images of cell substructures, DNA chains, proteins or viruses have been obtained with an atomic resolution, this allowing to go deeper into the comprehension of the functioning of these biological entities (Castón, 2020). In Fig. 14 we show images of numerous rabbit haemorrhagic disease viruses obtained from all the observations performed. We all remember the spectacular images of the SARS-Covid19 virus, that have been useful to know its functioning, therefore facilitating the design of the vaccines that have saved so many lives. The development of the CryoTEM technique has been very important for the current science, and that is why its inventors, Jacques Dubochet (1943-), Joachim Frank (1940-) and Richard Henderson (1945-), were awarded the Nobel Prize in Chemistry in 2017.

It is obvious that in the last forty years, the different microscopy techniques have gone a long way, but if

there is something that we must be sure of, is that these techniques will still experiment breakthroughs in the next years, surprising us with the achievement of great milestones, many of which are unfathomable today. Amazement and uncertainty are part of the adventure that making science entails.

Conclusions

The story that we have told regarding the field of electron microscopy is at par with the breakthroughs in the development of the devices in other spheres of science, such as the development of spectroscopy techniques, X-ray diffraction (with conventional diffractometers or giant synchrotrons), Nuclear Magnetic Resonance (NMR) instruments, powerful DNA sequencers, mass spectrometers, protein and metabolite analysers, particle accelerators, giant telescopes or simulation systems based on supercomputers, among others. All these advancements are and will be useful to expand scientific knowledge, the tool that provides us with the ability to understand our world.

We hope that the brief overviews provided in this article, as well as the exhibition on one of the most important scientific and technological developments in the last century have appealed to the readers. Probably, both articles will have seemed insufficient, and this would be a good sign, because this will surely fuel the desire for you to explore on your own, taking advantage of the enormous amount of information available in books (e.g., Alché et al., 2024) and in other formats and channels.

Figures

Fig. 1. “Diagram of a louse”, from *Micrographia* by Robert Hooke, 1665. Public domain. Wikimedia Commons.

Fig. 2. Current binocular optical microscope with its essential parts.

Fig. 3. Formula of the resolving power (RP) and the numerical aperture (NA) of an optical microscope, together with the diagram of the path followed by the light beams in a dry or an oil-immersed objective lens (illustration on the right). The acceptance angle of the lens is represented by θ . The wavelength of the light used is represented by λ , whilst 0.61 is a constant. The refraction index (n) of the medium between the sample and the objective lens is 1.0 in the case of air, whilst in the case of other substances it can be up to 1.5.

Fig. 4. Illustration made by Santiago Ramón y Cajal of a group of glial cells in the white matter of the brain. Image no. 11346 from the Cajal Legacy (CSIC).

Fig. 5. Crookes tube with a mineral. 1930-1950. Laboratorio Eléctrico Sánchez. On deposit by the grandchildren of Mónico Sánchez Moreno. National Museum of Science and Technology. Inventory no.: DO2010/004/0088. Photograph by Yolanda Villaverde.

Fig. 6. Ruska and Knoll working on the first electron microscope. Image published in (Ruska, 1979) and reproduced with the kind permission of Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina - Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saxony-Anhalt, Germany).

Fig. 7. Evolution of the resolution of the optical microscopes (circles), electron microscopes (squares) and electron

microscopes with aberration correction (triangles). The star represents the scanning tunnelling microscopy (STM). Based on (Liu, 2021).

Fig. 8. Diagram of a transmission electron microscope (TEM), model EM10C (Zeiss), Courtesy of Juan de Dios Alché Ramírez, PhD.

Fig. 9. Diagram of a scanning electron microscope (SEM), model DSM 950 (Zeiss), Courtesy of Juan de Dios Alché Ramírez, PhD.

Fig. 10. Poster published in 1979 by the company JEOL on the occasion of the 30th anniversary of its establishment, showing the main devices released by different companies to that date. Courtesy of JEOL.

Fig. 11. (a) Diagram of a scanning tunnelling microscope (STM) with its main components. (b) Example of the reconstruction of a surface from the scanning lines. Courtesy of Pedro Amalio Serena Domingo, PhD.

Fig. 12. 5-nm x 5-nm image obtained with scanning tunnelling microscopy (STM) in which 12 bromine atoms individually placed on a silicon (Si(111)-(7x7)) surface are shown. Author: Seung Yun Yang, University of Toronto (Canada). Runner-up image of the SPMAGE07 competition.

Fig. 13. Image obtained with atomic force microscopy (AFM) of a red blood cell infected with malaria. Author: Li Ang, National University of Singapore. Runner-up image of the SPMAGE09 competition.

Fig. 14. Empty particles of the rabbit haemorrhagic disease virus (RHDV) seen with cryogenic electron microscopy. These

particles have been used to develop new-generation vaccines. The image on the left shows the 3D reconstruction calculated from these images. Courtesy of José Ruiz-Castón (Spanish National Centre for Biotechnology, CNB-CSIC).

References

Alché Ramírez, J. D.; Asenjo Barahona, A.; García Martín, J. M. and Serena, P. A. (2024). *Las nuevas microscopías. Herramientas para la exploración del nanomundo*. Real Sociedad Española de Física – Fundación Ramón Areces – Libros de La Catarata.

Alché Ramírez, J. D. and Serena, P. A. (2025). Ocho décadas de microscopía electrónica en España. Curatorial article in this catalogue.

Asenjo, A.; García-Martín, J. M. and Serena P. A. (2022). 40 años viendo átomos. *Revista Española de Física*, 36(3), 5-11.

Barbero, S. (2025). Viendo más allá de la luz: los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica (1941-1964). Curatorial article in this catalogue.

Binnig, G. and Rohrer, H. (1987). Scanning tunnelling microscopy—from birth to adolescence. *Review of Modern Physics*, 59 (3), 615-625.

Calderón, H. A. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. *Mundo Nano*, 13(25), 133-156.

Cánovas Sánchez, F. (2021). *Santiago Ramón y Cajal. Maestro, científico y humanista*. Alianza editorial.

Castón, J. R. (2020). La Crio-Microscopía Electrónica para el estudio de virus y aplicaciones biotecnológicas. Sección “Acércate a” de la Sociedad Española de Biología y Biología Molecular. <https://sebbm.es/acercate-a/la-crio-microscopia-electronica-para-el-estudio-de-virus-y-aplicaciones-biotecnologicas/>

Challoner, J. (2019). El átomo: *Componente fundamental de todas las cosas*. AKAL.

De Felipe, J. (2005). Cajal y sus dibujos: ciencia y arte. In A. Martín Araguz (Coor.-Ed.), *Arte y Neurología* (pp. 213-230). Saned.

Egerton, R. F. (2005). Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Springer.

Eigler, D. M. and Schweizer, E. K. (1990). Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 344, 524-526.

Feynman, R. P. (1960). There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science*, 23 (5), 22-36.

Haguenau, F.; Hawsked, P.W.; Hutchinson, J. L.; Satiat-Jeunemaître, B.; Timon, G. T. and Williams, D. B. (2003). Key Events in the History of Electron Microscopy. *Microsc. Microanal.*, 9, 96-138.

Hawkes, P. (Ed.) (1985). *The Beginnings of Electron Microscopy*. Academic Press.

Hooke, R. (1665). *Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon*. Printed by J. Martyn, and J. Allestry. Royal Society (London). Accesible

on <https://www.gutenberg.org/ebooks/15491> thanks to the Gutenberg free e-books Project.

Larriba, M. (2020). *Ramón y Cajal. El ocaso de un genio*. Amarante.

Liu, J. (2021). Advances and Applications of Atomic-Resolution Scanning Transmission Electron Microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 27(5), 943-995.

Mestres Ventura, P. J. (2023). The electron microscope on the eve of its first centenary. *European Journal of Anatomy*, 27 (1), 111-127.

Miret, S. (2015). Mecánica Cuántica. Colección “Que sabemos de”. CSIC – Libros de La Catarata.

Reyes Gasga, J. (2020). Breve reseña histórica de la microscopía electrónica en México y el mundo. *Mundo Nano*, 13 (25), 79-100.

Rivera, M. y Arenas, J. (Ed.) (2020). La dimensión nano en la microscopía electrónica [Número completo]. *Mundo Nano*, 13 (25).

Ruska, E (1979). Die frühe Entwicklung der Elektronenlinsen und der Elektronenmikroskopie. *Acta Historica Leopoldina*, 12, 3-136

Ruska, E. (1987). The development of the electron microscope and of electron microscopy. *Review of Modern Physics*, 59, 627-638.

Sánchez Ron, J. M. (1997). J. J. Thomson y la génesis del descubrimiento del electrón. *Arbor*, 158(622), 137-171.

Sánchez Ron, J. M. (2000). Planck, Einstein y los orígenes de la física cuántica. *Arbor*, 167(659-660), 423–436.

Sanz Serrulla, F. J. (2022). *Cajal y las academias*. AACHE.

Serena, P. A. (2021). *Nanotecnología para el desarrollo sostenible*. Colección “Que sabemos de”. CSIC – Libros de La Catarata.

ThermoFisher (2022). *Thermo scientific - exploring uncharted realms with electron microscopy*.

ThermoFisher. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Handbooks/Exploring-uncharted-realms-with-electron-microscopy.pdf>

Thrower, K. (2005). The Fleming Thermionic Diode and the Birth of Electronics. *Transactions of the Newcomen Society*, 75(2), 229-259.

van Gorkom, J.; van Delft, D. and van Helvoort, T (2018). Chapter Two - The Early Electron Microscopes: Incubation. In P.W. Hawkes (Ed.) *Advances in Imaging and Electron Physics*, Vol. 208 (pp 43-128). Elsevier.

Seeing beyond light: the beginnings of electron microscopy in Spain through the RCA EMU-2A microscope of the Institute of Optics (1941-1964).

Sergio Barbero Briones

Introduction

The end of the 19th century and the beginning of the 20th century witnessed the birth of a series of decisive technical advancements (cathode-ray tubes, vacuum tubes, etc.) for the appearance of a new branch of science whose aim was to understand and handle the dynamics of electrons: electronics (Alché, 2025a).

Understanding those new devices, that were able to control the movement of electrons, required physical models that explained their dynamics. In 1927, Hans Busch (1884-1973) developed a theory that modelled the trajectories of the electrons in the cathode tubes. In his theoretical proposal, a magnetic field inducing coil acts on the electrons in the same way as an optical system that generates images modifies a light beam (Busch, 1927). That is why the formalism of the geometrical optics could be applied to the electron physics using the idea of an “electron magnetic lens.”¹ Besides, the “focal length” of this system could be controlled continuously by simply changing the electric current in the coil.

After Busch’s proposal, Ernst Ruska (1906-1988), that was working on the development of a cathode-ray

oscillograph at the Technical University of Berlin, under the supervision of Max Knoll (1897-1969), used Busch's theory to develop a system that acted like a magnetic electron lens, ending his project successfully, and he got to record the first "electro-optical images" in 1929 (Ruska, 1987, p. 610).

With the analogy between geometrical optics and the dynamics of electrons being so fertile, Knoll and Ruska ended up coining the term: geometrical electron optics (*geometrischen elektronenoptik*)². A new discipline was born: electron optics. Therefore, it is not strange that Luis Bru Villaseca (1909-1997) that, as we will see, was an essential figure in the development of electron microscopy in Spain, considered, in hindsight and correctly, that "electron microscopy starts as an emulation of optical microscopy" (Bru, 1982, p. 38).

During those "glorious" years of international research on electron dynamics, in Spain, the studies that were more related to this field were those having to do with the determination of the crystal structures: a line of research that was becoming consolidated, largely through the stimulus of the X-Ray Section of the National Physics and Chemistry Institute, lead by Julio Palacios (1891-1970) (Mañes, 2005). Palacios took charge of the prestigious Cajal Professorship, that had, as one of its goals, the integration of the Spanish science into the international sphere. In September 1928 the first course of the professorship was held, and it congregated, after an exigent selection process, ten young people that would have the privilege of being trained by one of the most important physicists in

Europe: Paul Scherrer (1890-1969) (Mañes, 2005, pp. 47-50; Pérez, 2012, pp. 363-364). Among them, there were two individuals that would become, after the Civil War, two of the essential leaders in the configuration of an epistemic³ community around the emerging electron microscopy in Spain. We are talking about Bru Villaseca, that was back then a student of physical-chemical sciences at the Central University, and José María Otero Navascués (1907-1983). They were 19 and 21 years old, respectively. That course would be decisive for the future trajectories of both. Getting to know Scherrer was crucial, because Otero decided to enrol on a visiting scholarship at the Institute of Physics of the Federal Institute of Technology Zurich. Later on, Otero continued his training at the Institute of Optics of the Technical University of Berlin, where he met Ruska.

In 1931, Ruska, following the techniques of geometrical optics, tried to increase the magnification of the images that he had obtained in 1929 with the combination of two "magnetic lenses", in the same way as in an optical system the magnification can be increased by using more than one optical lens. In this way, he got to build what is considered the first electron microscope in history (Ruska, 1987), although with a very limited magnification: 17.4x.⁴ A new kind of microscope was born, and because it had a resolving power that was higher than that of the optical microscopes, it was called *Übermikroskop*; a term that was sometimes translated to Spanish and other languages as hypermicroscope, or even supermicroscope, although finally, the not so superlative name of electron microscope prevailed.

Since Otero was in Berlin that year, it is more than probable that he was one of the first Spaniards to hear of such a crucial breakthrough. On the other hand, Bru also enrolled on a visiting scholarship between 1933 and 1934, under the supervision of Scherrer. During this period, he met Busch, who sparked his interest in electron microscopy (González, 1999). If Otero saw the very first advancements in electron microscopy, Bru was a privileged witness of the birth of the first electron microscope⁵.

In 1936, Bru wrote what probably was the first informative article in Spain on electron microscopy (Bru, 1936). In that article, Bru explains, clearly, the possible applications and potentialities of the new device:

One of the greatest applications that the electron microscope has already found, and that, most certainly, will increase considerably, is in the field of Biology. [...] It is expected that bacteria will be seen and that their structure will be studied with the help of this new observation method. [...] If we compare the path that has already been walked in this new stage with the short period of time used, we can think, without being too optimistic, that the electron microscope is a new methodology that will be surely implemented shortly.

Unfortunately, the Spanish Civil War entailed an interruption of the emerging studies in electron physics in Spain, in a period in which electron microscopy was born, as a discipline, in other countries such as Germany, Belgium, the United States of America, etc. Around that time, a group of auxiliary technologies relating to the

generation of electromagnetic fields, vacuum, etc. were sufficiently ripe to make the manufacturing of electron microscopes with commercial purposes viable. In 1938, whilst Bru was in Blas Cabrera's house, and Otero was a refugee in the Norwegian Embassy, the Siemens company developed the first prototype of a commercial microscope with a significant magnification that allowed its use for an important number of applications. Therefore, the Civil War, as in other fields of the Spanish science, implied a serious stoppage at a crucial time in the creation of some of the essential technologies in the 20th century. Although, luckily, this disruption, as we will see later, would not be irreversible thanks to the energy of some of these figures, specially Otero and Bru, that did not suffer the hardships of the following purge processes.

The electron microscope became an archetypal device of what has been called “a frontier instrument, an inventor of disciplines” and, therefore, “a producer of knowledge” (Santesmases, 2003). And that is not all, because we could also say that it acted as a “bridge machine” between disciplines: the physical-engineering and the biomedical disciplines. So, for example, in the Spain of the second half of the 20th century, the electron microscope was one of the decisive instruments for the development of the new biomedical sciences. The beginnings of electron microscopy and its development as a discipline in Spain (specially in its seminal stages) have a lot to do with the purchase and use, by the Institute of Optics (Instituto de Óptica, IO) of the Spanish National Research Council (Consejo

Superior de Investigaciones Científicas, CSIC), of the first electron microscope installed in Spain. Here we will focus on knowing the participants in this development: who they were, how they learned to use this microscope, and their motivations. This article is based on a previous one (Barbero, 2024). Another curatorial article in this catalogue expounds the evolution of electron microscopy at later times (Alché, 2025b).

Why Spain had to have an electron microscope?

After the Civil War, the benefits of purchasing electron microscopes in Spain were described by two scientific communities that were apparently separate: on the one hand physicists and engineers, and on the other hand biologists and physicians. The first ones (Otero, Bru, etc.) were fully conscious of the potential of this new technology because, as we have seen, they witnessed its birth. The latter soon confirmed the immense possibilities that this new instrument offered for their purposes.

A brand-new branch of biology, that was called microbiology, would not have been able to fully develop without the electron microscope. Microbiology, as an emergent research discipline in Spain, had the support of the all-powerful José María Albareda (1902-1966). After the Civil War, in 1940, he was appointed Secretary-General of the CSIC, becoming, without a doubt, the most decisive person in this first period of the CSIC.

A crucial milestone in the consolidation of microbiology as a discipline was the creation of the Institute of

Microbiology (Instituto de Microbiología) Jaime Ferrán in 1946, the same year in which the Institute of Optics was created. That same year, Julián Sanz Ibáñez (1904-1963), a physician with a vast career, became the head of the Cajal Biology Institute (Instituto Cajal de Biología). Also in 1940, Siemens, at Ruska's proposal, established a laboratory with five electron microscopes with the aim that they were used by visiting researchers. No doubt, the intention was to convince them of the potential of the new device. Sanz Ibáñez, who was then the secretary of the Cajal Institute (Instituto Cajal), carried out a visiting scholarship in Germany that same year, and among one of the many visits that he made, there was the one at Siemens, with the aim of knowing about the electron microscope. According to a later report by him (CSIC, 1942), "The electron microscope is very useful nowadays for the study of minerals and metals, from which excellent details of their structure are obtained, and also for viruses and the study of the big molecules."

Despite his limited activity in Spain, Gonzalo Palacios de Borao (1894-1967) deserves a special mention for being, probably, the first Spaniard that used profusely in his research the electron microscope. During 1947 he carried out two visiting scholarships at the laboratories of the Institute for Medical Research and the RCA's laboratories in Camden (New Jersey) (Palacios, 1950). As a consequence of those visiting scholarships, he published the first extensive monograph on the foundations and applications of electron microscopy in Spain. The text, entitled "Electron supermicroscopy"

(“Supermicroscopía electrónica”) (Palacios, 1950) was published in 1950. In 146 pages (with many figures and photographs: 17 and 73, respectively), he describes, educationally, both the foundations and the applications of the emerging electron microscopy.

The paperwork at the Instituto Alonso de Santa Cruz

Otero, that by the mid-1940s, had become a reference for the managers of the scientific-technological policies at the CSIC, tried to convince the authorities of the CSIC regarding the need for the purchase of an electron microscope. In a letter sent to Manuel Lora Tamayo (1904-2002), that was then a member of the Executive Board of the Permanent Commission of the CSIC, Otero put forward, skilfully, two arguments: the first one was why Spain had to have this technology, and the second one was which institution should be in charge of it (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1945):

It must be an extraordinarily effective instrument for research whose need has been made known to the different research sectors (Institute of Forestry [Instituto Forestal], National Institute of Aerospace Technology [INTA], Faculty of Sciences, Professorship of Metallurgy, etc.). The Institute “Alonso de Santa Cruz” is the only entity that has followed, through its Optics department, the development of electron microscopy, having collected all the literature that has been published, both in America and in Europe, about this subject.

Also, in this letter, Otero argued that one of the members of the Institute had been on a visiting scholarship in Sweden, having a first direct contact with an electron microscope. Additionally, it was no surprise, given the interest that this device had for the field of microbiology, and specially for edaphology, that Albareda supported the request. Otero achieved his goals, and in 1943 he initiated the first negotiations so the Institute of Physics (Instituto de Física) Alonso de Santa Cruz purchased an electron microscope from the Siemens company (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1945). Nevertheless, the high estimated cost for the Siemens model (900,000 pesetas) was an unsurmountable obstacle for its purchase. Given that, apart from the Siemens company, only the American company RCA commercialised electron microscopes available in Spain (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1945), the negotiations were reoriented towards the American company. The EMU-2A model was taken into consideration, because it allowed to reach a theoretical 100,000x magnification with microphotographic printing.

The need to legitimise the usefulness of the new instrument was urgent, so Otero published (Otero, 1944) a detailed and well-documented article (“Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico” [“Development, current state and possibilities of the electron microscope”]) in *Arbor*, the emblem journal of the CSIC. In this article, Otero emphasised that the importance of the new device laid in its extraordinary magnifying power, in contrast with the optical microscope, describing it, in this way,

as “a revolution in the means for the research of the microscopic world, with the same importance as what happened when the optical microscope was invented in the 17th century.” This was a convincing and validating speech by Otero, that was very talented regarding these persuasive abilities in other spheres.

Ultimately, Otero’s goal was not to simply have the device, but also to use it (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1946):

The use of this instrument in the new organisation would have two goals: one of them its use as a device for research, and the other one is the study of its theoretical and practical functioning to reach, when the moment comes, its production in Spain.

In the same way as Otero intended to create a Spanish industry of optical instruments, he also deemed viable that Spain could get to produce its own electron microscopes. Despite their greater technological complexity, it was not an absurd goal if we consider that in the early 1950s (Hawkes et al., 1996, p. 10) there were several countries that produced electron microscopes. But for this goal to take hold, it was inevitable to train a community of scientists and technologists with the required technical and organisational abilities.

The purchase of the RCA EMU-2A microscope and the creation of the Electron Microscope Section at the Institute of Optics

After a long administrative process full of difficulties, in March 1946, the RCA EMU-2A microscope was already

packaged and ready to be shipped to the Alonso de Santa Cruz Institute. Nevertheless, because the optics department of said institute had been transformed, by a Decree (22 February 1946) into the Institute of Optics “Daza de Valdés” (from now on IO), Otero asked Albareda for the microscope to be then directly managed by new institute (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1946). Fig. 1 shows a photograph of the Institute of Optics when the RCA EMU-2A microscope was already installed and operating at its full capacity.

The final cost was 350,000 pesetas, defrayed in full by the Secretariat-General of the CSIC (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956). It was a clearly high sum for a newly created institute, such as the IO. In fact, this sum corresponded to the total budget assigned to the IO by the CSIC for the whole of 1947. The new device was, therefore, the crown jewel of the newborn institute.

After several difficulties, the needed elements were not available until August 1947. A RCA’s technician, a Mr. Halma, was the person in charge of the assembly of the microscope. From the moment of the assembly until the end of that year, tasks regarding the calibration of the microscope were carried out. On 31 January 1948, the microscope was officially inaugurated with the presence of the Head of State, General Franco, this explaining the institutional importance given to this device. Fig. 2 shows a photograph of the piece of equipment installed at the Institute of Optics.

During 1947, in parallel to the purchase of the RCA microscope, the Photoelectricity and Electron Optics

Section was created, under the direction of José García Santesmases (1907-1989)⁶. Besides Santesmases, in January, Justo Mañas Díaz, also coming from the Institute Santa Cruz, joined this section as an honorary scholarship recipient. Mañas was the first person that received experimental training on the use of the RCA EMU-2A by the previously mentioned RCA's technician. When the microscope started to be operational, between the end of 1947 and the beginning of 1948, the section consisted of a chief of the section, a collaborator and an honorary scholarship recipient. The new "frontier instrument" lead, therefore, to a completely new line of research in the IO.

The start-up of the microscope (1948-1949)

The microscope was operational by the end of 1947. The following year, the services that were offered to other institutes of the CSIC were organized, with a certain predisposition to those related to biological applications (Santesmases, 1949).

The first uses of the RCA EMU-2A were related to two diseases with a bacterial aetiology that seriously affected health at that time: leprosy and tuberculosis (Santesmases, 1949). The first twenty-two photomicrographs⁷ were of Hansen's bacillus (*Mycobacterium leprae*) (Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1965). Fig. 3 shows the first photomicrograph obtained with the RCA EMU-2A microscope, and therefore the first electron microscopy image obtained in Spain. The assignment came from the Institute of Biology of Sarrià (*Institut Biològic de Sarrià*). The person

in charge of this study was father Joan Puiggrós Sala (1899-?), that was interested in developing a vaccine for leprosy. Regarding tuberculosis, the request came from Eliseo Gastón de Iriarte (1910-1983). Gastón was analyst and professor at the Bacteriology and Metabolism Services (Servicios de Bacteriología y Metabolismo) of the Provincial Hospital of Madrid, managed by Gregorio Marañón (1887-1960), where he was the greatest expert in Koch's bacillus. Fig. 4 shows an image of Kochs' bacilli (*Mycobacterium tuberculosis*) obtained with the RCA EMU-2A microscope and identified with number 25. The potential offered by electron microscopy to increase the knowledge of Koch's bacillus did not go unnoticed, because in 1951, a Zeiss electron microscope (model EM-8), the third electron microscope installed in Spain, was set up at the Antituberculosis Institute (Instituto Antituberculoso) Francisco Moragas (González, 1999). If the bacteriological applications were the first external assignments, the first internal studies within this section were focused on analysing the oxidation processes of certain metals and alloys using both the electron microscope and an electron diffraction editing.

With the consolidation of the Electron Optics Laboratory, the need for the normalisation of the services offered by the IO regarding the electron microscope was confirmed, specifically those oriented towards other institutes of the CSIC or other kinds of official organisations, and even companies. Due to that, a series of guidelines on the use of the electron microscope were drafted (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1949) that initiated what would later be called "Electron Microscopy Service."

The need for continuous training on the new electron microscopy techniques made that, in 1949, Santesmases enrolled on a visiting scholarship with a grant with Vernon Ellis Cosslett (1908-1990)⁸ at the Cavendish Laboratory. In addition, Cosslett was one of the most active promoters of the international institutionalisation of electron microscopy and, as we will see, would be crucial for the integration of Spain into this emerging international community. Nevertheless, that very prolific visiting scholarship regarding those two aspects would paradoxically entail a blow to Otero's project. Santesmases, motivated by his visiting scholarship in Cambridge, where he found out about the last advancements in computer studies, and because of his own personal evolution, decided to change his line of research and pursued electronic calculus, this is, computing. Therefore, Otero's project of creating a wholly Spanish electron microscope was replaced by another project, not less ambitious, of creating a Spanish computer. The truth is that the loss of someone so well trained and with leadership abilities like Santesmases at the head of the electron microscopy project was probably one of the determining aspects that caused, in the mid-term, that the project of creating a Spanish electron microscope was put aside.

As a final appendix to the review of these first years, we will briefly mention two scientifically innovative studies related to electron microscopy that, unfortunately, did not have a continuation, but that reveal that Otero's project was not limited to being mere receptors of foreign technologies and sciences. There was a more or

less realistic desire for a genuine scientific innovation. The first one was the idea of Santesmases and Mañas of developing an electron spectroscope using the photoelectric effect. The second, and more remarkable, was Ramón Ortiz de Fornaguera's (1916-1974) work. Ortiz was one of the theoretical physicists with a greater projection in Spain in the 1945-1955 decade. Otero managed for Ortiz to receive two grants to carry out a theoretical study on electron optics. Ortiz's work led to his Ph.D. thesis, supervised by Esteban Terradas (1883-1950), in which Ortiz "geometrised" the problem of the electron trajectories in an electron microscope using tools of the Riemannian differential geometry. Ortiz's geometric ideas were certainly original and novel, even at an international level. Despite the undoubtable quality of these theoretical studies, Ortiz, attracted by Otero, moved to the Nuclear Energy Board (Junta de Energía Nuclear). That frustrated, this time being the responsibility of Otero, the possibly only line of research, distinctly original and novel at an international level, in electron microscopy in Spain.

Objects and actors (1949-1960)

After what we could call "foundational period," from the arrival of the RCA EMU-2A microscope until Santesmases' resignation, a restructuring and consolidation period started that would englobe, basically, the 1950s.

Actors and institutional organization within the IO

Mañas took Santesmases' baton as the manager of the electron optics section. Fernando Catalina Perea (1925-1994) joined as a Ph.D. student, and Julia María González Peña (1925-2010) as a scientific collaborator at the IO. Fig. 5 shows some of the researchers of the optics section at that time. In 1952, the experimental capacities of the section increased considerably thanks to the start-up of a vaporisation at a high vacuum device built in the Instituto Torres Quevedo, that allowed, on the one hand, the manufacturing of mirrors and metallic surfaces and, on the other hand, the completion of the typical techniques of the electron microscope. The development of the technique of metallic vaporisations would entail the creation of an own line of research, with a long life ahead, within the IO (it is still active today) that would provide services both to the researchers of the institute and of other centres. In 1953, the section, now called Electron Optics Section (Sección de Óptica Electrónica) had managed to attain a certain competence in the development of instruments linked to the microscope.

Despite these diligent advancements, in 1953 Mañas resigned as the chief of the section (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), this entailing a new discontinuity, after that of Santesmases, that caused unexpected setbacks. Mañas' substitute as the manager of the section was Catalina, and González Peña remained as a collaborator. Nevertheless, the evolution of the section changed, in a decisive way, with

the arrival of Luis Bru in Madrid. In 1955 Bru obtained the Professorship of Theoretical and Experimental Physics at the University of Madrid. Nevertheless, after moving to Madrid, he expressed to Otero his interest in joining the Institute of Optics.

Otero embraced enthusiastically Bru's willingness and achieved the creation of a new department: the Department of Diffraction and its Applications (Departamento de Difracción y sus Aplicaciones), that allowed Bru to continue with his research in the diffraction of electrons. When Bru joined the IO, he was supervising the Ph.D. thesis of Rafael Márquez Delgado and Felicísimo Ramos Fernández, who joined the IO that year. On the other hand, in 1957 the serial use of the technique of replications was started, and therefore, the microscope reached capacities that were very similar to those of other European laboratories (Anonymous, 1961), this allowing to considerably increase the number of external services.

Circulation of knowledge

From its beginnings, the IO became an institution in which the scientific-technical training was an essential central concept, all the more since the need of training a team of professionals in new disciplines, such as electron microscopy, was urgent. Firstly, given the absence of experts in Spain, the training by foreign researchers and technicians was needed, and this was attained both through their visits to the IO and through the awarding of grants to Spanish researchers abroad.

Regarding the visiting scholarships of foreign researchers at the IO, the most relevant one was, undoubtedly, that of Cosslett in 1950. During his visit to the IO, Cosslett gave a series of conferences on electron microscopy. The visiting scholarships of Spanish researchers abroad were numerous from the beginning. In 1951, González Peña travelled to several electron microscopy laboratories in The Netherlands, Belgium and France. Catalina carried out a visiting scholarship for a year (1953-1954) at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig, under the supervision of Hans Boersch (Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), with the aim of performing a study on the correction of chromatic aberration, present in electron microscopy. Felicísimo Ramos was at the Imperial College of London studying the influence of electron beams on nickel deposits. Rafael Márquez studied at the Laboratory of Microscopy and Electron Diffraction of the CNRS in París, under the supervision of Trillat.

The attendance to international congresses was, of course, another way for the acquisition of knowledge and the establishment of relationships. Apart from the electron microscopy international meetings, that always featured the presence of Spanish representatives, the attendance to more regional meetings was also usual. For instance, in 1960, Bru, Catalina and Camuñas attended the European Conference on Electron Microscopy held in The Hague and Delft between August 28th and September 3rd.

The use of such a technologically complex device as the electron microscope involved not only a theoretical knowledge, but also, and in a greater degree, a knowledge with a practical nature, consisting in a series of skills regarding the handling and preparation of samples, the fine-tuning and the repairs of accessory elements, etc., and all this could only be learnt by using or seeing how the microscope was used. From 1952, the IO started to allow the visits of researchers and technicians (both national and international) so they could receive training in the handling of the microscope and in the technique for the preparation of samples, that was, without a doubt, an effective way to transmit the practical knowledge concerning the microscope.

More or less extensive courses were also organised. From 1949, the Superior Optics course was taught at the IO: it was a course that lasted two years divided in four semesters and that lectured, among other things, on the fundamentals of electron optics in a subject that lasted a semester and that was called “Electronic techniques and electron optics.” Among the courses taught at the IO, we must highlight the Microscopy Course, that was held between December 5th and 14th 1960. Although this course was oriented towards both optical and electron microscopy, it had a remarkable importance. The course consisted of seminars, conferences and demonstrations. The participants were able to carry out a series of personalised practices with different kinds of microscopes, including the electron microscope (Anonymous, 1961).

Lastly, in the 1960s, thanks to the existence of a very well edited magazine for the general public: Luz: Revista de información del Instituto de Óptica “Daza de Valdés,” a series of informative articles and pieces of news related to electron microscopy, both at the IO and in other places, were produced. Catalina wrote a seminal article in the magazine (Catalina, 1960): “Electron microscopy as a modern technique”, where the ensuing publication of specific articles on the application of electron microscopy to metallurgy, mineralogy, microbiology, solid state physics, medicine, etc. was announced. The second article appeared the following year (Anonymous, 1961), but due to unknown reasons the next ones did not get to appear.

The Spanish Electron Microscopy Society (Sociedad Española de Microscopía Electrónica)

During the 1940s, the first electron microscopy national societies or associations were established: the Electron Microscope Society of America (EMSA) in 1944, the electron microscopy group of the Institute of Physics in Great Britain in 1946, the Scandinavian Electron Microscopy Society (SCANDEM) in 1948, etc. The first attempts to create an international federation that brought together the national electron microscopy societies took place in the late 1940s and the early 1950s, under the sponsorship of the International Council of Scientific Unions (ICSU) (Cosslett, 1996). Finally, in 1955, an independent international federation called International Federation of Electron Microscopy Societies (IFEMS) was defined (Cosslett, 1996). One of

its main promoters, and its first secretary, was Cosslett, that would later decisively help the Spanish community in its international integration. The nine foundational member countries were Belgium, France, Germany, Great Britain, Japan, Sweden, Switzerland and the United States of America. In Spain, as Rafael González Santander relates (González, 1999):

Towards 1956, the contacts between the Spanish researchers favoured the need of all of them to be brought together in a scientific society that tended to assemble all the people and National Centres that had the common factor of using the electron microscope for their research.

It was glimpsed that a society, or a committee, was the ideal way to assemble this community. It also had to become integrated into the international community. As in other branches of science, and very specially optics (Barbero, 2021), the international integration was an incentive for the national structuring. In 1956, the first meeting of the International Federation of Electron Microscopy Societies was held, during the 3rd Electron Microscopy International Congress held in Stockholm between September 12th and 16th. Bru and Catalina attended the congress representing Spain. As Bru later reported, the acceptance of Spain by the Federation was achieved, this forcing, formally, the creation of a national committee or society. Consequently, the researchers at the IO initiated the procedures for the formal creation of the Spanish Electron Microscopy Society (Sociedad Española de Microscopía Electrónica, from now on SEME).

A first draft of the bylaws of the society was written. This document was unfortunately lost (González, 1999). The Governing Board, designated provisionally, was the following: Luis Bru Villaseca (president); Fernando Catalina Perea (secretary); Julia María González Peña (treasurer); and as board members: Miguel Rubio Huertos, Antonio Camuñas, Rafael Márquez Delgado and Juan José Alonso Pascual. All of them were linked to the CSIC, and there were five of them affiliated, full-time or part-time, to the IO that, one way or the other, had been users of the RCA EMU-2A microscope of the IO. All this reveals the capital importance of the CSIC in general and of the IO in particular in the structuring of this epistemic community. Therefore, the SEME established its domicile at the IO. When established, the SEME had a dozen members (González, 1999, p. 35). Through Cosslett's mediation (let us remember his close contact with Spanish researchers), the formal admission of the SEME to the newly renamed International Federation of Societies for Electron Microscopy (IFSEM) was reached, this happening during the celebration of the 4th Electron Microscopy International Congress in 1958. The formal legalisation of the society within the restrictive Francoist legal framework had to wait for a decade, until 1967, due to the absence of a law regarding associations¹⁰, this causing the society to function, meanwhile, with provisional bylaws.

From bacilli to uranium

As we have seen, the first commissions for photomicrographs received at the IO were made with the aim of studying the microbiology of pathogens.

These tasks went on during the early 1950s, for example with studies related to the evolutionary cycle of Koch's bacillus and the observation of the lung tissue affected by it. The photomicrographs were also useful to start to assess the therapeutic value of certain treatments. For instance, we must highlight the research performed together with the Antituberculosis National Board, in which the effects that the isonicotinic acid hydrazide (Isoniazid) had on the treatment of lung tuberculosis in patients in the Sanatorium of Alcohet (Guadalajara) were assessed. To end with the sphere of pathogenic microbiology, we will mention, due to its singularity, the use made of the microscope during the flu epidemics (known as Asian flu) of 1957-1958 that, only in Spain, caused some 10,000 deaths. Dr. Laureano Albaladejo isolated and cultivated the virus, and commissioned some 15 photomicrographs of this pathogen (some of which appear in Fig. 6). The news of this feat had a remarkable media coverage, and some of the photos obtained appeared in the press, such as the one shown on the newspaper *Pueblo*¹¹.

As we have seen, without Albareda's support, it would have been impossible to purchase the RCA EMU-2A microscope. Therefore, it is not strange that there were many collaborations held with researchers in the sphere of edaphology and related areas. One of the most remarkable studies was that led by Miguel Rubio on the morphology of certain pathogenic viruses of plants, a study in which pioneering micrographs of some of these viruses with a spherical shape were obtained. Another of the research lines of the Institute of Edaphology

(Instituto de Edafología) that needed the RCA EMU-2A microscope was the physical-chemical study of clays and kaolins from Spanish grounds and loams, that was something with a very clear technological interest due to their use as a raw material for the national ceramics sector. González Peña was the person in charge of coordinating this line of research, initiated in 1952, and that expanded for several years. The number of photomicrographs got to be so huge that it favoured that, in 1954, an agreement was signed that stipulated that half of González Peña's salary was to be paid by the Institute of Edaphology, and the other half by the Institute of Optics.

Another of the researchers involved in the study of clays was José María Serratosa (1924-2012), a person that, with time, would end up assuming a crucial role in the development of the science and technology of materials in Spain, especially at the CSIC. Serratosa is an example of a researcher that, although not being part of the IO's staff, could use the microscope directly. Another case is that of Juan José Alonso Pascual, researcher at the Institute of Edaphology, that holds the credit for being the external person to the IO that used the RCA EMU-2A more times, as it can be assessed by consulting the record book of the microscope.

Albeit microbiology and, particularly, the collaboration with the Institute of Edaphology, was, in the beginning, the predominant field, little by little the kind of applications diversified, specially those related to the structure of materials, some of them with a marked industrial interest and, therefore, coming from

companies that produced goods, or from associated technological centres. For instance, in 1952, a study on the morphology of wool was undertaken in collaboration with the Centre for Wool Studies of Béjar (Centro de Estudios Laneros de Béjar). Among these studies with an industrial interest, we must highlight a collaboration that is representative of how productive the interaction between the IO and the private industry was being: we are talking about the collaboration established with the INDO group, dedicated to the sector of ophthalmic lenses. The analysis of how the mechanisation process affected in its different stages (roughing down, refining and polishing) the optical surfaces of the ophthalmic lenses was carried out.

The use of the RCA EMU-2A microscope in the Spanish nuclear programme deserves a special mention. To a large extent, that programme was deemed feasible due to the presence of uranium ore in Spain. Therefore, one of the first objectives of the Nuclear Energy Board (Junta de Energía Nuclear, JEN) was to assemble a group of specific services with everything related to the prospecting and processing of the samples obtained from the uranium deposits. Among those services there was the Petrographic Laboratory (Laboratorio Petrográfico), set up in 1953 and managed by the young geologist Enrique Mingarro (1926-1998). That laboratory oversaw the analysis of samples of collected minerals, and to this end it had two microscopy cabinets (one optical and the other one electron microscopy).

The Electron Microscopy Cabinet of the Petrographic Laboratory was created thanks to the agreement

between the JEN and the IO, that was initiated in 1956. This allowed the JEN to use the IO's RCA EMU-2A microscope. In general, clays obtained from rocks near uraniferous seams and the elemental forms of the pre-crystalline and amorphous states of pitchblende were mainly studied. An example of the photomicrographs obtained in these studies is shown in Fig. 7. Because of this research, Catalina was appointed, in September 1958, one of the representatives of the Spanish commission at the second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy.

Times of changes in the institution and the instruments (1960-1964)

In September 1960, Bru's laboratory, with the agreement of the Institute of Optics, moved to the University of Madrid. Although Otero asked for the moving to be limited to the electron diffraction section, it was inevitable that it ended up affecting all the activities related to the Electron Optics Section. Even so, Bru kept his manager post in the diffraction department at the IO, although his activity decreased gradually, holding up only because of the close scientific relationship with Catalina. In 1961, the Electron Optics Section only included two people: Catalina, as the person in charge, and a single collaborator.

Despite all these blows, in 1964 the IO purchased a new electron microscope: the Siemens Elmiskop 1A model, that had a resolving power of 0.4 nm and a 200,000x magnification, and therefore replaced the now old RCA EMU-2A model. From the arrival of the new electron

microscope to the IO, only four more photomicrographs were made with the RCA EMU-2A microscope: one per year until the last one, that appeared in the record book, dated 14 October 1968. Therefore, this date symbolises the “demise” of this so essential protagonist in the history of electron microscopy in Spain. Despite the RCA EMU-2A microscope becoming obsolete, it remained in its original location until 2009, when it was donated to the National Museum of Science and Technology (Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, MUNCYT).

Despite the purchase of the new electron microscope, the IO's influence on the Spanish microscopy, dominant to this date, started to decline. This was a time of institutional changes. In 1957, the Centre of Biological Research (Centro de Investigaciones Biológicas, CIB) was created, and it set up a Microscopy Service. This service monopolised a good part of the electron microscopy assignments regarding microorganisms carried out at the CSIC. Nevertheless, it would be the Electron Microscopy Service of the University of Madrid, managed by Bru, the one that achieved the status of the new reference centre, at least in Madrid. Also, during these years, electron microscopy services appeared in other Spanish cities. The IO ceased to be the indisputable reference centre in Madrid, and this city was no longer the monopolizing centre of electron microscopy in Spain.

Conclusions

As we have seen, during the first years of the Francoist regime, the Institute of Optics “Daza de Valdés” was the cardinal institution for the introduction of electron microscopy as a new technical-scientific discipline in Spain. This influence was channelled through two tasks: 1) the diffusion of the potentials offered by the electron microscopy (thanks to the use of the RCA EMU-2A microscope) to a wide range of scientists, technologists, institutions and companies; and 2) the training of a first epistemic community around electron microscopy (that would become institutionalised as the Spanish Electron Microscopy Society) that through an “irradiation” movement would end up expanding itself over all of Spain. The function of being a promoting institution does not imply exclusiveness (for example, in the case of Catalonia), although it is obvious that the IO was the reference centre inasmuch as it innovated learning and organisational models.

Despite the discontinuities previously pointed out, in the period going from 1947 to 1967, 2,605 negatives were obtained, 36 reports were written, twelve scientific research articles were published (national and international) (Anonymous, 1961; Archivo Histórico Instituto de Óptica, 1956), and two Ph.D. theses on the microscope as an instrument were read. The consolidation of the electron microscopy during the 1960s sat on the foundations established in the previous decade thanks to researchers that at some moment interacted with the RCA EMU-2A model. All this justifies the conceptualisation of this microscope of the

IO as a “frontier instrument” and a bridge instrument between disciplines.

In the 1960s, the Spanish electron microscopy epistemic community was sufficiently widespread both in the disciplinary (biologists, physicians, engineers, physicists) and the geographical (CSIC, universities and even public health centres) spheres, and therefore it needed an well-established institution at a national level, and this is what the Spanish Electron Microscopy Society (Sociedad Española de Microscopía Electrónica, SEME) would become in the 1960s, specially after its formal legalisation in 1966. The evolution of the electron microscopy in Spain during the following decades is covered in the next article in this catalogue (Alché, 2025b).

Notes

1. A year before, in 1926, the analogy with optics had also helped Erwin Schrödinger to postulate his famous wave equation to explain quantum mechanics, for which he would be awarded the Nobel Prize in 1933.
2. Ruska himself wrote: “In analogy to the refraction of light rays at the surfaces (“Grenzflächen”) on passage through optical lenses, I wanted to use, for the electrical lens, the potential steps at corresponding surfaces, which are shaped like glass lenses. Thus, the energy of the electron beams is temporarily changed – just like light beams on passage through optical lenses” (Ruska, 1987).
3. Regarding the sociological concept of the “epistemic

community” applied to the history of Spanish science in the 20th century, see (Presas, 2021).

4. It is specially important to point out that Ruska and Knoll achieved this invention without knowing the wave-matter duality postulated by de Broglie (Ruska, 1987, p. 613). The most transcendental application of de Broglie’s postulate was made being unaware of its knowledge! Ruska heard of de Broglie’s theory for the first time in the summer of 1931.

5. Bru himself remembered it as follows: (Bru, 1982, p. 32): “I myself, in Zurich, in 1933, knew as Busch’s disciple, this first stage: a stage that must be considered heroic. This description is well-deserved. I always remember that the diagrams were obtained by taking a photograph with a Leica camera of the image that appeared on the fluorescent screen of the device.”

6. Regarding Santesmases, see <https://dbe.rah.es/biografias/10432/jose-garcia-santesmases>.

7. This was the term used to name the images recorded by the electron microscopes. Oral account given by José Antonio Aznárez Candao (5 August 2023).

8. Cosslett, pioneer of the electron microscopy in England, established, in 1947, the Department of Electron Microscopy in the University of Cambridge.

9. Geometrical abstraction, from the work of Bernhard Riemann (1826-1866), of the concept of surface in dimensions exceeding the number of three, in which the geometrical properties fulfil certain properties and vary subtly from one point to another point. The Riemannian geometry has, as particular cases, other geometries, such as the Euclidean geometry.

10. It did not appear until 1964. The Law governing associations (Law 191/1964). Official State Gazette (BOE) No. 311 of 28 December 1964.

11. In the article that appeared on the newspaper Pueblo (p. 17, Madrid, Tuesday 3 December 1957), the following was stated: “This photograph has needed sixteen hours to be taken. In it we can perfectly see this virus that has only been photographed three times in the world: in Singapore, in the United States of America and now in Spain. Dr. Albaladejo was helped by Mr. José María Otero and Mr. Fernando Catalina, manager of the Department of Optics.”

12. Since 1967, annual meetings and conventions would be held. The 1st Annual Scientific Meeting and Convention of the SEME was held on 13 April 1967 at the Conference Room of the Institute of Optics (González, 1999, p. 90).

Figures

Fig. 1. Institute of Optics in the first lustrum of the 1950s. Photographic Collection of the Dorotea Barnés Library. Available at the Photographic Collection María Teresa Vigón (Identification No.: FFMTV195x-00001). <https://www.io.csic.es/FFMTV/ffmtv195x-00001/>.

Fig. 2. Photograph of the RCA EMU-2A microscope installed at the Institute of Optics. Image from (Anonymous, 1961).

Fig. 3. Paper cover (above) and glass slide (below) of the first photomicrograph obtained with the RCA EMU-2A microscope, showing the negatives of *Mycobacterium leprae*. Note that the slide is broken. This is the remaining fragment. MuNCyT Archive.

Fig. 4. Paper cover (above) and glass slide (below) with negatives of Koch's bacillus (*Mycobacterium tuberculosis*) obtained with the RCA EMU-2A microscope and identified with number 25. MuNCyT Archive.

Fig. 5. Photographs (obtained from their personal files) of some of the researchers at the IO related to electron microscopy. (a) Fernando Catalina Perea; (b) Antonio Camuñas Puig; (c) Julia María González Peña.

Fig. 6. Paper cover (above) and glass slide (below) with negatives of the Asian flu virus obtained with the RCA EMU-2A microscope. These photomicrographs, identified with number 681, were obtained on 26 November 1957. MUNCYT Archive.

Fig. 7. Paper cover (above) and glass slide (below) with negatives of replicas of Spanish pitchblende obtained with the RCA EMU-2A microscope. These photomicrographs, identified with number 659, were obtained on 22 July 1957 by Dr. Catalina. MuNCyT Archive.

References

Alché Ramírez, J. D. and Serena, P. A. (2025a). La microscopía electrónica. Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica. Curatorial article in this catalogue.

Alché Ramírez, J. D. and Serena, P. A. (2025b). Ocho décadas de microscopía electrónica en España. Curatorial article in this catalogue.

Anonymous (1961). Instituto de Óptica de Madrid. La investigación en óptica y microscopía electrónica. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica "Daza de Valdés"*, 7(Nov-Dic), 8-11.

Archivo Histórico Instituto de Óptica (1945). *Nota para el Sr. Lora. Escrita probablemente por José María Otero Navascués en fecha alrededor de noviembre de 1945.*

Archivo Histórico Instituto de Óptica (1946). *Carta del secretario del Instituto Nacional de Física Alonso de Santa Cruz al secretario del CSIC*, 4 de marzo de 1946.

Archivo Histórico del Instituto de Óptica (1947). *Carta de Otero Navascués al presidente del CSIC*, 20 de enero de 1947.

Archivo Histórico del Instituto de Óptica (1949). Normas que han de seguirse en la Sección de Óptica Electrónica del Instituto de Óptica "Daza de Valdés" para realizar investigaciones con el microscopio electrónico en colaboración con otros centros. 23 de marzo de 1949.

Archivo Histórico Instituto de Óptica. (1956). *Instituto de Óptica 1946-1956.*

Barbero, S. (2021). El nacimiento de la Sociedad Española de Óptica: De la integración internacional a la construcción nacional (1946-1970). *Óptica Pura y Aplicada*, 56(1), 1-16.

Barbero, S. (2024). Viendo más allá de la luz: El inicio de la microscopía electrónica en España a través de su primer microscopio electrónico (1941-1964). *Óptica Pura y Aplicada*, 57 (2) 51172.

Bru Vilaseca, L. (1936). El microscopio de electrones. *Revista Las Ciencias de Madrid*, III(1), 1-11.

Bru Vilaseca, L. (1982). Cincuenta años de difracción y microscopía electrónica. Universidad de Santander.

Busch, H. (1927). Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. *Arch. Elektrotechnik* 18, 583-594.

Catalina, F. (1960). La microscopía electrónica como técnica moderna. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica "Daza de Valdés"*, 2(Nov-Dic), 39-42.

Catalina, F. (1962). La microscopía electrónica en España. *Luz: Revista de información del Instituto de Óptica "Daza de Valdés"*, 10(May-June), 43-45.

Cosslett, V. E. (1996). Early history of the International Federation of Societies for Electron Microscopy. En Mulvey, T. (Ed.) *The Growth of Electron Microscopy*. Advances in Imaging and Electron Physics. Academic Press, 3-20.

CSIC (1942). *Memoria del CSIC de los años 1940-1941*.

CSIC (1950). *Memoria del CSIC del año 1949*.

González Santander, R. (1999). *La microscopía electrónica española en la investigación científica 1946-1999 (Sociedad Española de Microscopía Electrónica 1956-1999)*. Universidad de Alcalá de Henares.

Hawkes, P. W. & Kasper, E. (1996). *Principles of electron optics: Basic geometric optics Vol I*. Academic Press.

Mañes Beltrán, X. (2005). *Determinación de estructuras cristalinas en España: inicios, desarrollo y consolidación*. [Ph.D. Thesis, Autonomous University of Barcelona].

Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (1965). *Libro de registros del microscopio RCA EMU-2A (1947-1965)*.

Otero, J. M. (1944). Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico. *Arbor*, January(1), 85-102.

Palacios de Borao, G. (1950). *Supermicroscopía electrónica*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Pérez Fernández, C. (2012). *José María Otero Navascués. Ciencia y Armada en la España del siglo XX*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Presas i Puig, A. (2021). Epistemic Communities and Science Makers in the Franco Regime. A Study of the Nuclear Energy Board. In M. Janué i Miret and A. Presas i Puig (Eds.), *Science, culture and national identity in Francoist Spain 1939-1951*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Ruska, E. (1987). The development of the electron microscope and the electron microscopy. *Rev. Mod. Phys.* 59(3) 627-638. (1932-1982).

Santesmases, J. G. (1949). *Resumen de la labor realizada por D. José García Santesmases, Jefe de la Sección de Óptica Electrónica*. Archivo Histórico del Instituto de Óptica.

Santesmases, M. (2003). Neutralidades y atrasos: ciencias y tecnicismo en la España de Franco. En *Actes de la VII Trobada d'Història de la Ciència i de la Tècnica*. IEC, 63-78.

Eight decades of electron microscopy in Spain

Juan de Dios Alché Ramírez
Pedro Amalio Serena Domingo

Preface

In the two previous curatorial articles, well-differentiated topics have been addressed. In the first one (Alché and Serena, 2025), a brief historical outline on the innovations of the electron microscope and the tunnel effect microscope has been offered, as well as the way in which these two devices work, their applications and the evolution that these microscopy techniques will have in the future. In the second article (Barbero, 2025) we have delved into the implementation of this technique in Spain and the nucleation of a small but very active scientific community expert in electron microscopy. In this third article we make a longer journey through the history of the electron microscopy in Spain, adding to the speech the different devices that are part of the exhibition “Giants to see the tiny. Electron microscopy,” all of them installed between the 1940s and the 1980s. This journey will not be excessively thorough, due to the number of exhibited devices and the limitations of the catalogue itself. It is also impossible to summarise, in a few pages, the activity developed in eight decades by thousands of people in innumerable university departments, research centres or scientific-technical services. This article focuses on showing the evolution of electron microscopes, using,

to this aim, the pieces of equipment shown at the exhibition, mentioning what they were used for, and knowing some of the people that were linked to these devices. These people are a minimal representation of the large Spanish scientific community that managed to be at the vanguard of this technique, overcoming all kinds of adversities and conditionings.

Science in Spain: researching in turbulent times

In the last two decades, numerous articles and books have been published that describe the troubled relationships of Spain with modern science (Sanz Menéndez, 1996; Otero Carvajal et al., 2006; Sánchez Ron, 2003a, 2003b, 2003c; Puig-Samper Mulero, 2007; Romero de Pablos and Santesmases, 2008; González Ibáñez and Santamaría García, 2009). These relationships are only understood within the evolution of the historical, financial and social contexts of our country in the last two centuries.

There definitely is a certain consensus in considering that Spain's slow decline in the 17th and 18th centuries was concurrent with the growth of other powers in which a great scientific-technological development took place. Spain was able to maintain a good scientific level in the 18th century thanks to the drive of an illustrated monarchy like that represented by some kings of the Bourbon dynasty. Nevertheless, the historical events at the end of the 18th century and during a great part of the 19th century favoured that Spain took a path somehow distant from that of developing a competitive

industrial network and a solid academic system. Remembering the events that appear in the Spanish history books, during this fateful period, invasions, wars against foreign powers, coup d'états, the loss of the continental American territories, several internal armed conflicts, political persecutions, changes of regime, etc. took place. Without a doubt, the unstable context, together with a social inertia not very fond of changes were not favourable for planning and developing education, science and technology as it was being done in other countries. In this way, Spanish research did not follow the great scientific-technological current that developed during the 19th century in Great Britain, France, Germany and, incipiently, in the USA.

During that century, the Spanish university was still practising a teaching mainly oriented towards the repetition of contents from times gone by to which isolated innovations coming from foreign countries were added, without making relevant contributions to the ensemble of all this new knowledge. As it normally happens, all the rules have their exceptions, and in the field of medicine there were some individuals of note, among which we must highlight Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), who, with his personal efforts and determination, made a place for himself in the international scientific scene.

The cherry on the cake regarding this situation was the war against the USA, in which Spain lost its last territories in America and Asia in 1898. The consternation that this loss caused inspired Regenerationism, that had been advocated by certain social sectors in the last decades

of the 19th century. Regenerationism represented an attempt to make a change of direction to get on board of all those opportunities that had gone past, including modern science and technological development. These movements also received the influence of ideas from institutions such as the Free Educational Institution (Institución Libre de Enseñanza, ILE) or from experiences developed in other countries. In the academic field, it was obvious that a renovation of people, infrastructures and work dynamics was needed. The scientific leadership of Cajal was indisputable after receiving the Nobel Prize in Physiology and Medicine in 1906, and this made him a national scientific icon. Nevertheless, as important as his scientific activity was his commitment to the reorganization of the structure of science in Spain. In this way, he accepted to lead the Board for the Extension of Scientific Studies and Research (Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, JAE) from the moment of its creation in 1907. The work of Cajal together with that of José Castillejo Duarte (1877-1945), secretary of the JAE, went on for almost three years, designing and carrying out several strategic actions despite the constant political turbulence, so typical of Spain.

This combination of institutional stability and academic leadership allowed the launching of a new model, as well as having time to correct it to adapt it to the circumstances. This model had a few basic premises. On the one hand the training of new generations of researchers in international reference centres through a system of pensions (grants), therefore

weaving a network of international relationships and collaborations, and on the other hand the creation of laboratories and scientific institutes comparable to those of other countries, with their own budget, advanced equipment and technical staff, that the researchers trained abroad would join to carry out their research and train new generations of scientists.

The impact of the JAE's model has been studied thoroughly, and it entailed a change in the way in which the Spanish scientific community, that sought their homologation with the international scientific community, worked. The arrival of the Second Republic in 1931 or the demise of Cajal in 1934 did not entail great changes in the strategy developed by the JAE, that during the first third of the 20th century had been consolidating a modern network of research centres. Nevertheless, the military coup d'état in 1936, the subsequent Civil War, the defeat of the government of the Republic and the establishment of a national-Catholic dictatorship by General Francisco Franco entailed a clear discontinuation in the trajectory of Spanish science.

The creation, in 1939, of the Spanish National Research Council (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC), gathered the institutes created by the JAE, expanded their scope to different universities not located in Madrid, and at the same time it resumed the research activities, relying on a scientific community decimated by the exile or the political purging: processes that generated vacancies that were occupied by people with an ideological affinity

with the Francoist regime. The CSIC had, among its goals, providing scientific-technological support to the diminished industry of Spain. All this was carried out under the design and control of José Ibáñez Martín (1896-1969), Minister of National Education between 1939 and 1951, and first President of the CSIC, and of José María Albareda (1902-1966), that assumed the post of General Secretary of this institution between 1940 and 1966. The reorganisation around the CSIC and of other smaller organizations conditioned the evolution of the Spanish science for a good part of the second half of the 20th century. Another facet that must be highlighted regarding the post-war science was the scarcity of resources, that was a reflection of a time in which other priorities demanded more attention and efforts by the authorities of Spain.

We must underline that there were certain ways of working and making science established by the JAE that were preserved within the CSIC's scientific community (Santesmases, 2007). For instance, the training of researchers in prestigious foreign centres, maintaining and increasing the networking with the international academic community was still given priority. It was also deemed essential to acquire modern pieces of equipment, generally imported, because the most sophisticated devices could rarely be produced in Spain. Another aspect that must be highlighted is the importance that the CSIC had in the publishing of journals, monographs and collections that were useful to control the scientific production and give visibility to the politics of the government regarding science,

but that were useful to register, in great detail, all the research carried out at the CSIC's institutes.

It is in this context in which the activity of the CSIC was developed during the 1940s, and in which the first electron microscope was purchased and installed in 1947 at the Institute of Optics "Daza de Valdés" (Barbero, 2024; 2025), thanks to the interest and efforts of researchers like Luis Bru Villaseca (1909-1997) and José María Otero de Navascués (1907-1983) (Bru, 1936; Otero, 1944). Bru was the first person that worked in Spain in the field of the diffraction of electrons, starting his work in 1931, at the JAE's National Physics and Chemistry Institute (Bru, 1981), a little after the discovery of the undulating nature of electrons, therefore proving that the Spanish science followed very closely the research performed abroad. Indeed, the Spanish scientific community was acquainted with the advancements in electron microscopy since practically its birth. We must highlight the articles published in the journal *Investigación y Progreso* signed by Ernst Ruska himself and his collaborators (Ruska, 1934; Ruska 1940), as well as the one published by Heinz O. Müller (Müller, 1940). This journal was founded in 1927 and was managed, until 1936, by the German paleontologist Hugo Obermaier (1877-1946), a prominent figure in the field of prehistory and archeology in Spain. It is also interesting to stress how the general press spread the surprising advancements of electron microscopy, as confirmed by several pieces of news that appeared in Spanish newspapers in the 1930s and 1940s¹.

A journey through four decades of electron microscopy in Spain

Once we have outlined the most relevant aspects of the context in which electron microscopy appeared in Spain, in this section we will carry out a little bit more detailed description about the way in which electron microscopy spread into the Spanish academic institutions. With that goal, several articles published by people that, in some cases, held important responsibilities in the Spanish Electron Microscopy Society (Sociedad Española de Microscopía Electrónica, SEME) have been reviewed (Catalina, 1962; González Santander, 1965, 1966, 1998; González Santander and Martínez Cuadrado, 1973a, 1973b; Bru Villaseca, 1981, 1992; Aballe, 1989; Fernández-Galiano, 1992). These articles, published between 1962 and 1992, allow to reconstruct the expansion of electron microscopy and know, especially until the 1970s, the people who were responsible for the devices that were installed in Spain. On the other hand, it is surprising that since the late 1980s a detailed inventory of the devices installed in the different Spanish universities and research centres has not been made, because this prevents us from knowing how the electron microscopes pool has evolved in the last 35 years.

The study of the implementation of electron microscopy in Spain was carried out in four years: 1962, 1966, 1973 and 1989, that are the dates of the publishing of the articles written by Fernando Catalina (Catalina, 1962), Rafael González Santander (González Santander, 1966), González Santander himself together with Gloria Martínez Cuadrado (González Santander and Martínez

Cuadrado, 1973) and, lastly, Miguel Aballe (Aballe, 1989). In some cases, there are certain inconsistencies between the data that appear in the articles, as sometimes they consider the date of the purchase whilst in other cases they take into account the date of the installation. On the other hand, the devices purchased by some private organizations are not included in all the lists. With these limitations, Fig. 1 gives account of the evolution of the total number of electron microscopes installed in Spain in the studied period.

It is obvious that in the 1946-1961 period, the installation of devices took place at a slow pace (a piece of equipment every two years, approximately) because of the scarce investment dedicated to science in Spain. In the next period (1962-1966), the pace of the installation of electron microscopes increased to two devices per year. This was due to the improvement of the economic circumstances and to the start of the expansion of the scientific community that worked in electron microscopy. In 1966, the 20 machines that were listed in the electron microscopes inventory were located in 5 provinces, although 75% of them were in Madrid, the place where numerous institutes and laboratories affiliated to different ministries were located. Up to that date, all the installed devices were transmission electron microscopes (TEMs), because scanning electron microscopes (SEM) started their launching in 1965. The manufacturers with a greater representation were Philips, Siemens and RCA.

In the census carried out in 1973, we see that the pace of the installed devices in the period 1966-1973

risks to some 9 per year. This increase is due to the inauguration, in 1964, of the National Fund for the Development of Scientific Research (Fondo Nacional para el Desarrollo de la Investigación Científica) within the first Development Plan created to drive economy further (Sanz Menéndez, 1996). This fund allowed the universities to have direct access to the financing of research without having to go through the control of the CSIC, as it had happened previously. This fact facilitated the decentralization of science in general and of electron microscopy in particular. In this way, in 1973, the devices installed in Madrid represented 50% of the total, whilst the other half were in electron microscopy services located in university faculties and in engineering schools of 17 provinces. This inventory now detected the presence of 7 SEM devices (9% of the total). Regarding the manufacturing companies, Philips and JEOL held the first places in terms of installed devices. Companies like Siemens and RCA went on losing importance among the producers of electron microscopes, and they both withdrew from the market by the late 1960s (Alché and Serena, 2025).

In the list of 83 devices installed in Spain until 1973, only 4 (5%) had a woman as the person in charge. These pioneering women in the use of electron microscopy in Spain were María Asunción Sáenz de Cenzano, who already in 1956 was in charge of a RCA machine at the company Etino-Química S.A., in Monzón (Huesca); Dr. María del Carmen Risueño, that was in charge of two devices (Philips and JEOL) installed at the Ramón y Cajal Board (Patronato Ramón y Cajal), that belonged to

the CSIC, in 1969 and 1971; and Dr. Julia María González Peña, that was in charge of a Siemens device installed in 1972 at the Institute of Ceramics and Glass (Instituto de Cerámica y Vidrio, ICV), pertaining to the CSIC.

In the last year that was studied (1989), the pool of installed apparatus reached 310, this showing that the installation of electron microscopes had increased to 14 devices/year in the 1973-1989 period. With the arrival of the democratic regime, there was a reconsideration of the scientific policies and a considerable increase in investments with the aim of converging with the most developed European countries. A reflection of this effort is captured in the increase in investments in science. In 1970, Spain invested 0.2% of its gross domestic product (GDP) in research and development, and this amount reached 0.8-0.9% in 1990 (Sanz Menéndez, 1996). Also, the consolidation of the Autonomous Communities (regional governments), with competence in scientific-technological research, together with the publishing of laws that drove the autonomy of the universities, were key to encourage the decentralization of the pool of installed electron microscopes. In 1989, the percentage of pieces of equipment installed in Madrid dropped to 38%, and there were 32 Spanish provinces that had EMs. Regarding the kind of machines listed as operational in this latter period, almost 40% were SEM, this proving the penetration of this microscopy technique.

We must point out here that many of the electron microscopes provided a service in conditions that were not always favourable, because the scarce financing hampered the purchase of spare parts or the hiring of

maintenance services provided by foreign companies or by intermediary companies based in Spain. Another endogamic problem of the system, that we still suffer, was the lack of technical staff that allowed to increase the use of the devices, therefore improving the efficiency of the investments made. Anyhow, despite the Spanish scientific ecosystem not being so evolved as that of the great scientific powers in the world, the community that was dedicated to electron microscopy was able to follow the pace of the research carried out abroad.

The devices in the exhibition: figures and feats

The exhibition “Giants to see the tiny. Electron microscopy” displays a group of devices from the collection of apparatuses of the National Museum of Science and Technology (Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, MuNCyT). All these microscopes were installed in different Spanish institutions during the time englobed by the previously referenced articles. We specifically have a piece of equipment from the 1946-1961 period, two from the 1962-1966 period, one from the 1967-1973 period, and five from the 1974-1989 period. Also dating from this latter period we can find the first tunnel effect microscope (*Scanning Tunnelling Microscope, STM*) installed in Spain.

Next, we will make a brief review of the devices shown at the exhibition, of some of the people that worked with them, their areas of research and their most important feats. The images of the different electron microscopes can be found in the part of the catalogue dedicated to

the devices shown at the exhibition. The title of each of the following subsections shows the kind of microscope (TEM, SEM or STM), the company that manufactured them, the model and the year of purchase or installation.

TEM, Radio Corporation of America (RCA) - EMU-2A (1946)

Although in other articles (Barbero, 2024; 2025) many details about this historic device are provided, here we want to emphasise that this machine (probably the most important one in this exhibition) meant a considerable monetary investment, but it had a great impact on science at that time, just as the Francoist regime took care of advertising². This device and their first users were the seed of a whole school of electron microscopy that arose at the CSIC's Institute of Optics (Instituto de Óptica) "Daza de Valdés," in a period in which making science was something heroic, seen from the current perspective. This microscope was used to carry out observations of hundreds of varied samples provided by researchers from different fields that wished to see with their own eyes the wonders that this device offered thanks to its resolving power of some 10 nm and its 20,000x magnification. Many of these observations have been gathered in several articles published in journals and monographs published by the different CSIC's institutes.

The exhibition includes a brief interview³ to Dr. José Antonio Aznárez Candao, Research Professor at the CSIC, now retired, that was the last person who worked with this machine together with Prof. Fernando Catalina

Perea, another of the key figures of electron microscopy in Spain (Barbero, 2024; 2025).

TEM, Technika Slaboproudová (TESLA) - BS 242A (1962)

This device is one of the rarities of this exhibition, not so much for its specifications and the use of the apparatus, but because it was purchased from the Tesla factory located in Brno (former Socialist Republic of Czechoslovakia), at a time in which the relationships with the countries of the former Soviet Union's (USSR) orbit were almost inexistent. This instrument (with a resolving power of 3.5 nm and a 30,000x magnification) was installed in the Hospital de la Concepción (Jiménez Díaz Foundation) thanks to the intermediation of an engineer from that country. It was with this piece of equipment that the first observations of the internal structure of cells, together with important research in pathological anatomy, especially in the field of nephrology, were made⁴. The person that led this research was Dr. Horacio Oliva Aldámiz,⁵ who wrote countless articles and books, among which we must underline the first monograph published in Spain on the cell ultrastructure (Oliva, 1964). Fig. 2, obtained with this microscope, shows an image of a cell with different organelles.

TEM, Siemens & Halske - ELMISKOP 1A (1964)

Once the Second World War ended, Ernst Ruska reinitiated, in the Siemens company, his work on the design and assembly of electron microscopes (Alché and Serena, 2025). As a result of this work, in 1954, this

company launched onto the market the mythic Elmiskop 1 model. A few years later it would release the Elmiskop 1A variant. Siemens managed to install some 1,200 devices of both models globally. One of them arrived in the Institute of Optics (Instituto de Óptica) “Daza de Valdés” in 1964 to replace the RCA EMU-2A device, that had become obsolete after having paid a great service to the Spanish science.

The Elmiskop 1A apparatus worked with accelerating voltages of 40-100 KV, reaching a magnification of some 200,000x, with an impressive resolution of some 0.5 nm. This TEM used double lenses for the electron beam condensation stage, this allowing to control the lighting of the sample very well, therefore minimising the damage caused by the electron beam, so it was appropriate for the study of biological samples. This piece of equipment included other improvements, such as the electron diffraction system or the ability to capture a great number of images in each session. Fig. 3 shows a diffraction (or microdiffraction) pattern of a MoO₃ glass obtained with this apparatus. Through these patterns one can determine if the sample is a disordered system or if its atoms form a periodic structure and its crystallographic system (cubic, hexagonal, trigonal, etc.).

Dr. Aznárez, that managed to work with the RCA EMU-2A device, as previously mentioned, was one of the first that used the Elmiskop 1A model at the Institute of Optics (Instituto de Óptica), getting to be the manager, from 1972 to 1995, of the Electron Microscopy Service of that centre. During a good part of that period, Dr.

Aznárez used the Elmiskop 1A machine to characterise materials of interest for the different lines of research at the institute, and among them the materials related to photographic films, as well as those used in the different light and other electromagnetic radiations detection systems.

TEM, Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) - JEM 200A (1972)

This device was purchased by the Complutense University of Madrid (Universidad Complutense de Madrid, UCM), and was installed at the Material Physics Laboratory of the Faculty of Physics of the UCM. It worked with an accelerating potential of 200 kV, and images with a 200,000x magnification and resolutions near to half nanometre were obtained. This microscope was used by many researchers, and among them, the key figure represented by Luis Bru Villaseca, of whom we have talked in the previous curatorial article (Barbero, 2025) stood out. This piece of equipment was used in the research of the physical properties (mechanical, electronic, optical, magnetic, etc.) of numerous materials with the aim of understanding the existing relationship between their structure at a nanometric scale and such properties. This instrument was also used to study the materials fatigue, with the aim of understanding how the microcracks originate and spread through materials subjected to deformations, high temperatures or great thermal gradients. One of the disciples of Luis Bru, Dr. Javier Piqueras, Professor Emeritus of the UCM, is the person that appears in the audiovisual presentation shown at the exhibition and

whose image also appears in Fig. 4 while handling the JEOL JEM 200A device.

TEM, Hitachi Ltd. - HU 12A (1974)

This machine was installed in 1974 at the Department of Pathological Anatomy of the Hospital 12 de Octubre of Madrid. We must mention that an identical device was located in the Hospital de la Concepción (Jiménez Díaz Foundation), replacing the Tesla microscope that is also part of this exhibition and that has been previously described. This apparatus worked at 125 kV, obtaining images with a 500,000x magnification and resolutions that neared 0.2 nm. It was used to perform research in biomedicine, characterising the internal structures of healthy cells or of cells that were affected by some diseases, with the aim of understanding how the ailments appear and develop, knowing the morphology of the parts damaged by a disease and establishing the effects of the medical treatments. This microscope participated in more than 25,000 clinical studies of patients during its 25 years of service.

The person that had the greatest connection with this device during its operational period was Dr. Miguel Ángel Martínez González, attending physician and chief of the Pathological Anatomy section at the University Hospital 12 de Octubre. Dr. Martínez has been interviewed on the occasion of this exhibition, and his account is reflected in the audiovisual presentation shown together with the device. Fig. 5 shows one of the images obtained with the Hitachi HU 12A apparatus.

SEM, International Scientific Instruments (ISI) / SMS-2 (1974)

The strategy of making scans with the electron beam to obtain information of the surface of samples dates back to the 1930s, but it was not until 1965 when the first SEM was released by the company Cambridge Instruments. The use of SEM devices spread quickly, having a great impact on fields such as biology or materials science.

This ISI / Akashi – SMS 2 device is the first of the three SEMs shown at the exhibition. It was installed in 1974 at the CSIC's Royal Botanical Garden (Real Jardín Botánico, RJB), and it had a nominal resolving power of some 7 nm and a 160,000x magnification. This piece of equipment was used in numerous botanical studies, allowing to characterise different parts of plants, such as trichomes and pollen grains, as well as the morphology of their chromosomes. These studies are important for the identification of the external traits of plants with the aim of facilitating their taxonomical classification. This information is essential for knowing the natural heritage of a region, as well as its evolution due to natural causes or because of the effect of human actions. An example of the images captured with this apparatus is shown in Fig. 6.

Supporting the display of this device, the exhibition shows an audiovisual presentation containing an interview to Dr. Josefa Jiménez Albarrán, retired curator of the MuNCyT, who used this SEM for her Ph.D. thesis at the Complutense University of Madrid. It is important to point out that, for many years, the person who knew in depth and handled this machine was Mr. Miguel

Jerez, technician at the RJB. Thanks to his work, other researchers such as Dr. Concepción Sáenz Laín (expert in pollen) or Dr. Francisco de Diego Calonge (expert in fungi) were able to perform important studies. It is interesting to note that many articles that show images obtained with this device were published in the journal *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, established in 1941.

SEM, Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) - JSM-35C (1978)

This device, manufactured by the Japanese company JEOL, was installed in 1978 at the Civil Engineering School (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos), at the Polytechnic University of Madrid (Universidad Politécnica de Madrid, UPM). This SEM could reach a resolution of some 10 nm and a 180,000x magnification. It also had certain technical improvements in comparison with its predecessors, such as the autofocus, the astigmatism correction or the anti-vibration systems, this allowing it to be used both for routine quality control tasks and for advanced research.

The interviewed person that appears in the audiovisual presentation linked to the device shown in the exhibition is Dr. José Ygnacio Pastor, Professor of Materials Science and Engineering, currently on active duty at the UPM, who was the last person who worked with it and took care of keeping it in good condition until it was transferred to the MuNCyT. This machine has been used to carry out numerous studies on metallic

(steels and aluminium) and ceramic materials oriented to the determination of the relationship between the microscopic structure and the mechanical properties of the material. Also, this microscope was used to study the evolution of the microstructure when pieces made with a material are subjected to certain strains or extreme environmental conditions, this allowing to study their possible failure. Fig. 7 shows an image obtained with the JEOL – JSM-35C apparatus of a ceramic-metallic material after suffering a fracture.

TEM, Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) - JEM 100B (1978)

This TEM was installed approximately in 1978 at the Molecular Biology Centre (Centro de Biología Molecular “Severo Ochoa” (CBM). It used an accelerating potential of up to 100 kV, reaching a resolution of 0.2 nm and a 500,000x magnification. This device was successfully used to study different viruses and cells, as well as cell organelles. The study of the sub-cellular structures allows to know how the cell machinery works, detect possible failures in these structures or in their functioning, understand the diseases linked to these failures and study possible treatments of these diseases.

For many years, the person in charge of this machine was Dr. José López Carrascosa, Research Professor of the CSIC, now retired, and former chief of the Department of Macromolecules of the National Biotechnology Centre (Centro Nacional de Biotecnología, CNB), a centre where the device was sent after its stage at the CBM. Dr. López Carrascosa appears in the brief documentary shown

together with the apparatus. Some of his findings are the description in 3D, for the first time, of a molecular motor, or his studies on molecular chaperones. With this piece of equipment several kinds of bacteriophages were studied in different moments of their development (isolated, outside a cell, on the cell surface, introducing their genetic material in a cell, etc.). Numerous protein structures were also characterised. An example of these studies is shown in Fig. 8, that illustrates the action of an endotoxin on the assembling process of the microtubules (cell structures with a cylindrical shape that take part in several cellular processes).

SEM, International Scientific Instruments, Inc. (ISI) & Kevex Corp. - ISI SS-60 (1981)

This is the third SEM shown in the exhibition. It is an ISI SS-60 model manufactured by the companies International Scientific Instruments and Kevex. It was installed in 1981 in the Materials Testing Laboratory of the Technical School of Aeronautic Engineers (Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, ETSIAE), at the UPM. This device was the first SEM in this school, and this allowed to experience a qualitative leap in the studies carried out there, as a resolution of some 4 nm and a 200,000x magnification was reached. With this SEM, materials used in aeronautics, such as metals, Al, Mg and Ti metal alloys, and superalloys capable of withstanding high temperatures were studied. This machine also analysed defects in pieces made with different materials when subjected to great strains, deformations or high temperatures.

The exhibition also shows an audiovisual presentation of an interview to Dr. José María Badía Pérez, Professor Emeritus of the UPM. Dr. Badía was in charge of a SEM JEOL apparatus installed at the National Institute of Aerospace Technique (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) in 1976. At the INTA he had Dr. José María Pintado, one of the greatest experts in the failure of materials at an international level, as his mentor. In 1982, he obtained a post at the ETSIAE, where he started to handle the SEM ISI SS-6 in research lines similar to those developed by the INTA. Dr. Badía, together with other people like Dr. Miguel Aballe Carride and Dr. Paloma Adeva Ramos, researchers at the National Centre for Metallurgical Research (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM), pertaining to the CSIC, organised meetings, schools and courses to enhance the use of scanning electron microscopy in Spain. As a result of all that activity, after ten years of efforts one of the reference books of this technique in Spain and Ibero-America was published (Aballe et al., 2000).

STM, IBM Laboratory at Rüschlikon, Zurich (Switzerland) - Prototype (1984)

This is another of the outstanding devices in the exhibition. It is a tunnelling effect microscope (STM) manufactured in the laboratories that the American company IBM has in the small town of Rüschlikon, near Zurich (Switzerland). This device was designed and assembled by Dr. Heinrich Rohrer and Dr. Gerd Binnig, inventors of this technique, that was awarded the Nobel Prize of Physics in 1986, shared with E. Ruska,

co-inventor of the electron microscope. The technician Cristoph Gerber also participated, in a decisive way, in the design and assembling of this device.

This machine was transported, in 1984, from Switzerland for its installation in the Department of Fundamental Physics of the Faculty of Sciences of the Autonomous University of Madrid (UAM). This fact turned Spain into one of the first countries that had the chance to use this amazing technique, with which the atomic resolution is attained regularly. The arrival of this piece of equipment to Madrid was a bizarre adventure in which professors Nicolás García García and Arturo María Baró Vidal, of the UAM, participated (Asenjo, 2022), and it has been the subject of interesting documentaries.^{6,7} Shortly after its installation in Madrid, this instrument was used to perform the first observation of the bacteriophage virus $\phi 29$ with an atomic resolution (Baró et al., 1985), this being a real feat at the time, especially if we bear in mind the rudimentary way of representing the scans that the tip of the STM carried out on the sample (see an example in Fig. 9).

The STM device shown in the exhibition is complemented with the account of Dr. Julio Gómez Herrero, Professor of the Department of Condensed Matter Physics of the UAM. Dr. Gómez Herrero witnessed the arrival of this instrument at the UAM and knew, firsthand, the enthusiasm that having access to this sophisticated machine caused among the scientific community. This enthusiasm gave rise to a Spanish school with a great standing at an international level that was devoted first to the design and use of the STM, and later to the

development of the techniques derived from the STM that are now included under the acronym SPM (*Scanning Probe Microscopy*).

Recent history of electron microscopy in Spain

By the end of the 1960s, there were more than 300 microscopes installed in Spain, not all of them with the same degree of use, that made up a vast network of microscopy services managed by universities and research centres, where a great number of scientific and technical staff developed their activity. Many of these people were part of the Spanish Electron Microscopy Society (Sociedad Española de Microscopía Electrónica, SEME) whose beginnings have been described in the previous curatorial article (Barbero, 2025). Since 1984, the year corresponding to the most modern device shown in the exhibition, until today, four decades have passed that have been marked by the vertiginous exponential development of the microscopy techniques, as outlined in the first curatorial article in this catalogue.

We can say that, in general, this quick evolution of electron microscopy, in its different varieties, has been followed closely by the Spanish scientific community, not without a significant effort, because Spain is still characterised by an investment in research and development lower than that of the more developed countries, as well as having a planning and management of resources that is clearly improvable.

In this section we will outline the development of Spanish electron microscopy in the last forty years.

On the one hand we will offer a brief review of the evolution of the SEME, and on the other hand we will describe the creation of great collaborative services and infrastructures that have allowed to follow the global trends that have appeared in the field of electron microscopy.

From the Spanish Electron Microscopy Society to the Microscopy Society of Spain

Since its establishment in 1956 and its international recognition in 1958 (Barbero, 2025), the SEME was active in the organisation of meetings, courses and conferences. The activity of the SEME until the end of the 20th century has been documented in different studies (Catalina, 1962; González Santander, 1966; González Santander and Martínez Cuadrado, 1973a; Bru Villaseca, 1981, 1992; Aballe, 1989; Hawkes, 2003).

Between 1956 and 1960, the members of the SEME held internal meetings related to its organisation and launching, its connection to international forums, etc. From 1960, there were meetings with a clear scientific nature, held every two years, in which the Exchange of knowledge was prioritised. These meetings were initially held in Madrid but were later organised in different places of Spain.

We must highlight the milestone that entailed, for the SEME, the celebration, in 1992, of the X European Electron Microscopy Congress (EUREM X) in Granada. This event gathered more than 1,400 people from 48 countries, among which the delegations from Germany, France, the United Kingdom and Italy stood

out. We can say that after this successful congress, confirmed by the letter shown in Fig. 10, the process of internationalisation of the Spanish electron microscopy became established.

From 1998, the SEME started publishing a bulletin with articles and pieces of news of interest, while increasing its activity in the organisation of courses, photography competitions, etc. Another noteworthy occurrence that happened in 1999 was the change of name of the SEME, that became the Microscopy Society of Spain (Sociedad de Microscopía de España, SME),⁸ this allowing to include, in a same society, the powerful scientific community from the SPM microscopy that appeared in Spain by the mid-1980s, as well as to converge with the growing community of users of advanced photonic microscopies, absolutely complementary, and in many cases able to reach subcellular resolutions thanks to their latest advancements.

In 2006, in the headquarters of the central organisation of the CSIC, the commemorative event of the 50 years of the creation of the SME, with the participation of numerous members of the Society and where two conferences were given on the areas of life sciences and materials, took place. The first of these two conferences was given by Prof. Richard Henderson, of the Medical Research Council Laboratory of Molecular Biology (MRC LMB) in Cambridge (UK), who little after (in 2017) was awarded the Nobel Prize in Chemistry “for developing the electron microscopy for the structural determination, with a high resolution, of biomolecules in solutions.” The conference also included the presentation of a

brief historical glossary by Dr. Inmaculada Herrera Calvet, President of the SEME between 1980 and 1994. Fig. 11 shows the poster with the announcement of this important event.

Prof. Henderson, as well as other noteworthy researchers in the field of microscopy as, for instance, Prof. Joachim Frank, of the University of Columbia (New York, USA), co-awarded with the Nobel Prize in Chemistry in 2017, have participated regularly in activities organised by the SME, collaborating, specially, with groups such as the cryo-electron microscopy (CryoEM) facility at the CNB-CSIC, about which we will talk later.

Currently, the SME has 207 full members, 30 corporate members and 6 honorary members. The members of the SME are research staff, technical staff, company managers and different professionals from public (institutes, universities) and private institutions that are interested in the development and knowledge of microscopy in all of its aspects. As shown in Fig. 12, the distribution regarding the gender of the full members is relatively balanced, with a significant change in this regard in the last 50 years. As for the subject of research, there is a similar proportion of members dedicated to life sciences and the science of materials. Regarding the geographical distribution of the members, it is represented by a good number of Autonomous Communities (and there are even foreign members), although there is a greater presence of members from the larger capitals, that amass most of the devices, institutes, universities and centralised microscopy services.

The SME is part of the European Microscopy Society (EMS), where it plays an important role. For instance, the the former President, currently member of the Executive Board of the EMS (Prof. José M^a Valpuesta, CNB-CSIC), is an active member of the SME. The SME is also part of the International Federation of Societies for Microscopy (IFSM), that has two members of the SME (Profs. Jordi Arbiol and Raúl Arenal) in the Governing Board. As representatives of the SME, the members of this Governing Board participate in the scientific committees of numerous events, among which we find the European (EMC) and the International (IMC) Microscopy Congresses.

Among the activities carried out currently, the SME co-finances the organisation of training courses in microscopy planned by its members, and organises its own courses, frequently as activities before congresses. The SME awards grants to the young researchers for their participation in international congresses and for relevant activities related to microscopy, and it specially encourages the activity of these young researchers with the organisation of biennial prizes to the best Ph.D. theses in the fields of life sciences, materials science and technological developments.

Other activities include the organisation of events such as photograph competitions and the participation of the members of the SME's Board as experts in this kind of contests. Likewise, the SME has an excellent relationship with the companies related to microscopy, encouraging their participation in the numerous activities held and

facilitating the exchange of information between them and the members.

No doubt, one of the most relevant activities of the SME is the organisation of biennial congresses. Since 1984, although discontinuously, and since 2009, continuously, the biennial meetings of the SEME have been organised together with the Portuguese Society of Electron Microscopy (SPMicros) in the series of congresses called “Microscopy at the Frontiers of Science” (MFS). In some exceptional editions, the French Society of Electron Microscopy (2011) and the Israel Society for Microscopy (2013) have also participated. These congresses, that combine both national and international participation, have been held steadily until the past MFS2023 in the city of Braga (Portugal), as a continuation, presential in this case, of the MFS2021 congress, also organised by the International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL) of Braga, but held online because of the COVID pandemics.

Among the updating activities of the SME, the prominent pressing actions are the creation of an inventory of the current electron microscopy devices and of a digital archive of historical activities, documents and materials of the Society, in a clear alignment regarding the objectives with these curatorial articles and the exhibition “Giants to see the tiny. Electron microscopy,” organized by the MuNcyT.

The great electron microscopy centres

Electron microscopy, like the rest of the branches of knowledge, has evolved in the last decades, producing

more sophisticated devices that have incorporated methods for the correction of the aberrations that allow the obtaining of increasingly better resolutions. This requires a precise design of the lenses, an ultrastability of the electronics of the device and powerful systems for the obtaining, analysis, treatment and reconstruction of images in which sensor systems and powerful processing pieces of equipment play a key role. At the same time, the analytical instruments incorporated into the microscopes have improved, so that the diffraction techniques or the different spectroscopies allow the obtaining of very precise images and characterisations of small regions of the sample. The possibility of working with biological samples at low temperatures has enhanced the development of Cryo-Electron Microscopy. These techniques have been joined by the different optical microscopies, that have gone on with their evolution, leading to correlative microscopies. These kinds of advancements have facilitated the arrival of the 3D electron microscopy, that has the ability to perform tomographic studies of the sample with the individualised identification of the atoms. The advancements in the SPM techniques are equally spectacular and they look for, just as in the case of electron microscopy, a greater resolution, the full characterisation of the sample at an atomic level, ultra-quick measurements to see the evolution of the sample in the typical time taken by the changes, etc.

Science is a collaborative and also a competitive activity, and this implies having access to state-of-the-art devices that allow to expand the limits of knowledge. The

permanent technological and methodological evolution generates the need for the use of next-generation, highly sophisticated instruments, that are expensive regarding their cost, installation and maintenance. This has shaped a new way of considering the way in which the scientific community gains access to these instruments, that should be more rational and optimise their efficient use, as well as allowing these devices to be cutting-edge. In the case of Spain, almost 20 years ago a decision was made for the establishment of a network of Unique Scientific and Technical Infrastructures (Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares, ICTS) with an exceptional nature that requires high investment, maintenance and operational costs, and that allow their availability to the scientific community through a competitive access.⁹

In the specific case of electron microscopy, in Spain an ICTS called Integrated Infrastructure of Electron Microscopy (Infraestructura Integrada de Microscopía Electrónica de Materiales, ELECMi)¹⁰ has been created with a distributed nature and formed by four great electron microscopy centres that work coordinately: the National Centre of Electron Microscopy (Centro Nacional de Microscopía Electrónica) in Madrid; The Advanced Microscopies Laboratory (Laboratorio de Microscopías Avanzadas) in Saragossa; The Division of Electron Microscopy (División de Microscopía Electrónica) at the University of Cadiz, and the Unit of Electron Microscopy Applied to Materials (Unidad de Microscopía Electrónica Aplicada de Materiales) at the University of Barcelona. The ELECMi offers access

to advanced transmission and scanning electron microscopy methods and techniques (with a resolution of 0.05 nm in some cases), and the preparation of samples and the treatment of images and data through computer methods. In this way, the needs for the study and characterisation of samples at an atomic scale in studies in numerous fields such as biomedicine, materials, catalysis, energy, telecommunications, etc. can be covered.

Besides these infrastructures that work coordinately at a national level, other microscopes are still being installed in places where the volume of samples that must be analysed justifies it, as it happens in the case of the cryomicroscope installed in the National Biotechnology Centre (Centro Nacional de Biotecnología, CNB) of the CSIC, or the three powerful microscopes installed in the synchrotron ALBA, that constitute the power platform JEMCA (*Joint Electron Microscopy Center at ALBA*).

Conclusions

This article represents a brief tour through the history of the Spanish electron microscopy, using as an inspiration the ten devices shown at the exhibition, as well as trying to show how, once the time covered by it has gone by, the Spanish scientific community has maintained, with its efforts and perseverance, the abilities that allow it to retain its competitiveness, without losing sight of the structural problems that still need to be solved.

It is obvious that the space limitations and the context of a curatorial article limit our ambition of being more

thorough and going deeper. In any case, we expect that through the outline provided with these three curatorial articles, the reader has a closer vision of the fascinating irruption that electron microscopy entailed in the scientific and technological scene, has seen its vertiginous development and transversal impact, has caught up with the latest advancements in this technique, knows a little more about the role played by the Spanish scientists in all this process, and, maybe that they wish to expand their knowledge of these magnificent and sophisticated instruments that have been and will be our “eyes” for the exploration of matter at a minute scale.

Notes

1. Many of these reviews can be found at the Virtual Library of Historical Press (Biblioteca Virtual de Prensa Histórica), on the Internet: <https://prensahistorica.mcu.es/es/inicio/inicio.do>
2. Front page of the newspaper ABC from Madrid dated 1 February 1948 in which General Franco himself appears beside the device. The NO-DO (cinematographic news programme) also broadcasted a report in 1948, available at <https://www.rtve.es/filmoteca/no-do/not-267/1465447/> (from minute 2:46 to 4:32).
3. The interviews made to the different figures linked to each device are part of the virtual exhibition that can be seen on <https://www.muncyt.es/exposiciones/muncyt-alcobendas>
4. More information on this device can be found at the database of the Digital Network of Collections of Museums of Spain (Red Digital de Colecciones de Museos de España, CERES) of the Ministry of Culture of Spain. You can access it

at <https://ceres.mcu.es/pages/AdvancedSearch> entering the inventory number CE1992/024/0001.

5. An interview made to Dr. Horacio Oliva Aldámiz can be found in a documentary of the series “Exhibits with Memory” (“Piezas con Memoria”) of the MuNCyT. You can access it at the following link: https://www.youtube.com/watch?v=HLtDTK5k_iE
6. Documentary “Exhibits with Memory: Tunnel effect microscope” (“Piezas con Memoria: Microscopio de efecto túnel”). FECYT (Spanish Foundation for Science and Technology) Science Channel (Canal FECYT Ciencia) on YouTube. You can access it at <https://www.youtube.com/watch?v=3QYiF-LaOpE>
7. Documentary “40 years seeing atoms” (“40 años viendo átomos”). CSIC Disseminates Channel (Canal CSIC Divulga) on YouTube. You can access it on <https://www.youtube.com/watch?v=pJ0MtKqTOco>
8. The information on the organisation and activity of the Spanish Microscopy Society (Sociedad de Microscopía de España) can be found on its webpage <https://www.microscopia.org/>
9. The updated map of the Scientific and Technical Unique Infrastructures (Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares, ICTS) can be found on the webpage <https://www.ciencia.gob.es/Organismos-y-Centros/ICTS.html>
10. More information on the ICTS’s Integrated Infrastructure of Electron Microscopy of Materials (Infraestructura Integrada de MICROscopía Electrónica de Materiales, ELECMI) can be found on its webpage: <https://elecmi.es/>

Figures

Fig. 1. Total number of electron microscopes installed in Spain according to the inventories made in 1961, 1966, 1973 and 1989.

Fig. 2. Image with a 12,500x magnification obtained in 1979 from a cell with its nucleus, nucleolus, endoplasmic reticulum and peripheral pinocytosis vesicles. An intercellular matrix can be seen between several cells. Image courtesy of Dr. Federico Rojo Todo and description provided by Dr. José Fortes Alén (both members of the Jiménez Díaz Foundation – Quirónsalud Group).

Fig. 3. Microdiffraction image of a MoO₃ glass obtained on 3 May 1967 using the Elmiskop 1A device of the CSIC's Institute of Optics. Courtesy of Dr. José Antonio Aznárez Candao.

Fig. 4. Dr. Javier Piqueras (sitting) and Dr. José Serna, beside the JEOL JEM 200A at the Faculty of Physics of the Complutense University of Madrid. Courtesy of Prof. Javier Piqueras.

Fig. 5. Image of a single cell whose nucleus is infected with adenoviruses (hexagonal inclusions). The image was taken with the Hitachi HU 12A microscope at the Pathological Anatomy Service of the Hospital 12 de Octubre of Madrid. Courtesy of Dr. Miguel Ángel Martínez González and Dr. Marina Alonso (Hospital 12 de Octubre of Madrid).

Fig. 6. Image of a woolly rock rose pollen (*Halimium lasianthum* subsp. *lasianthum* (Lam.) Spach) grain taken with the ISI / Akashi – SMS 2 device. Courtesy of Dr. Josefa Jiménez Albarrán.

Fig. 7. Image obtained with the SEM JEOL – JSM-35C device at the Polytechnic University of Madrid (UPM) showing the surface of a metal-ceramic material after suffering a fracture process. Courtesy of Dr. José Ygnacio Pastor, Professor of Materials Science and Engineering at the UPM.

Fig. 8. Microtubules assembled in vitro in presence of a bacterial endotoxin (lipopolysaccharide or LPS). The microtubules were processed with a negative staining with uranyl acetate. The image (a) is that of the control microtubules (without exposure to the endotoxin), whilst images (b) and (c) are those of microtubules incubated with endotoxin with a tubulin/LPS proportion of 10 and 100, respectively. The scale bar represents 100 nm. Image obtained in October 1989 by Dr. Cristina Risco Ortiz and provided by Dr. José López Carrascosa.

Fig. 9. Image of the topology of bacteriophage ϕ 29 obtained with an STM device of the Autonomous University of Madrid (Universidad Autónoma de Madrid, UAM) on 13 June 1985. Courtesy of Dr. Arturo María Baró.

Fig. 10. Letter from Dr. Hugh Y. Elder, President of the Royal Microscopical Society (the association that organized the IX EUREM, held in York, United Kingdom) to Prof. Antonio Ríos, organiser of the X EUREM in Granada, congratulating him for this congress.

Fig. 11. Poster of the Commemorative Ceremony for the 50th anniversary of the Spanish Microscopy Society (Sociedad de Microscopía de España).

Fig. 12. Basic statistical indicators of the distribution of the full members of the SME. A: Percentage of men/women.

B: Percentage of members dedicated to the two basic disciplines in which the SME is organised. C: Institutional geographical distribution of the members. Data from the SME in December 2023.

References

Aballe Caride, M. (1989) Situación de la microscopía electrónica en España, 1988. *Bol. Soc. Esp. de Cerámica y Vidrio*, 28 (4), 293-297.

Aballe Caride, M.; López Ruiz, J.; Adeva Ramos, P., and Badía Pérez, J. M. (1996). *Microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X*. CSIC.

Alché Ramírez, J. D. and Serena, P. A. (2025). La microscopía electrónica. Desvelando los secretos de la naturaleza a escala atómica. Curatorial article in this catalogue.

Asenjo, A.; García-Martín, J. M. and Serena P. A. (2022). 40 años viendo átomos. *Revista Española de Física*, 36(3), 5-11.

Barbero, S. (2025). Viendo más allá de la luz: los inicios de la microscopía electrónica en España a través del microscopio RCA EMU-2A del Instituto de Óptica (1941-1964). Curatorial article in this catalogue.

Barbero, S. (2024). Viendo más allá de la luz: El inicio de la microscopía electrónica en España a través de su primer microscopio electrónico (1941-1964). *Óptica Pura y Aplicada*, 57 (2) 51172.

Baró, A. M.; Miranda, R.; Alamán, X.; García, N.; Binning, G.; Rohrer, H.; Gerber, C. H., and Carrascosa, J. L. (1985). Determination of Surface Topography of Biological Specimens at High Resolution by Scanning Tunnelling Microscopy. *Nature*, 315, 253-254.

Bru Villaseca, L. (1936). El microscopio de electrones. *Revista Las Ciencias de Madrid*, 3(1), 1-11.

Bru Villaseca, L. (1981). Cincuenta años de difracción y microscopía electrónicas. *Aula de Cultura Científica* 11, Fundación Marcelino Botín.

Bru Villaseca, L. (1992). The early days of electron microscopy in Spain. *European Microscopy & Analysis*, September, 13-15.

Catalina, F. (1962). La microscopía electrónica en España. *Luz: Revista de Información del Instituto de Óptica “Daza de Valdes”*, 10 (mayo-junio), 43-45.

Fernández-Galiano, D. (1994). Apuntes sobre la historia de la microscopía en España. *Microbiología SEM*, 10, 343-356.

González Ibáñez, C., and Santamaría García, A. (Ed.) (2009). *Física y Química en la Colina de los Chopos. 75 años de investigación en el edificio Rockefeller del CSIC (1932-2007)*, CSIC.

González Santander, R. (1965). Actualidad de la microscopía electrónica en España. *Arch. Fac. Med.*, 6, 389-395.

González Santander, R. (1966). *Manual de Microscopía Electrónica*. Instituto Cajal – CSIC.

González Santander, R. (1998). Fifty years of electron microscopy in Spain. *European Microscopy & Analysis*, September, 9-12.

González Santander, R. and Martínez Cuadrado, G. (1973). Análisis de la microscopía electrónica española en 1973. *Arbor*, 84 (327), 101-108.

González Santander, R. and Martínez Cuadrado, G. (1973). Los ochenta y tres microscopios instalados en España, *Arch. Fac. Med. Mad.*, 24(4), 221-234.

Hawkes, P. W. (Editor) (2003). *Advances in Imaging and Electron Physics*, vol 127. Academic Press.

Müller, H. O. (1940). Fundamentos y desarrollo del hipermicroscopio. *Investigación y Progreso*, 11, 3-12.

Oliva Aldámiz, H. (1964). *Ultraestructura celular*. Editorial Paz Montalvo Diana.

Otero Carvajal, L. E. (Dir.); Núñez Díaz-Balart, M.; Gómez Bravo, G.; López Sánchez, J. M; Simón Arce, R. (2006). *La destrucción de la ciencia en España*. Editorial Complutense.

Otero, J. M. (1944). Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico. *Arbor*, 1, 85-102.

Puig-Samper Mulero, M. A. (Ed.) (2007). *Tiempos de investigación. JAE-CSIC, cien años de ciencia en España*. CSIC.

Romero de Pablos, A. and Santesmases, M. J. (Ed.) (2008). *Cien años de política científica en España*. Fundación BBVA.

Ruska, E. (1934). El microscopio de rayos catódicos como ultramicroscopio. *Investigación y Progreso*, 8, 189-191.

Ruska, H., von Borries, B., y Ruska, E. (1940). La importancia de la hipermicroscopía en la investigación de los virus. *Investigación y Progreso*, 11, 71-79.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (II): El primer tercio del siglo XX. *Revista Española de Física*, 17(2), 8-14.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (III): La Guerra Civil y sus consecuencias. *Revista Española de Física*, 17(3), 9-15.

Sánchez Ron, J. M. (2003). La Física en España (IV): la Era Franquista. *Revista Española de Física*, 17(4), 7-13.

Santesmases, M. J. (2007). Viajes y memoria: las ciencias en España antes y después de la Guerra Civil. *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia*, 58(2), 213-230.

Sanz Menéndez, L. (1996). La construcción institucional de la política científica y tecnológica en el franquismo. *Redes (Universidad Nacional de Quilmes)*, 3(6), 77-123.

The exhibition

GIANTS TO SEE THE TINY ELECTRON MICROSCOPY

The temporary exhibition “Giants to see the tiny” proposes a tour around ten electron microscopes that are part of the collection of the National Museum of Science and Technology. These scientific instruments represent the beginnings of electron microscopy in Spain, a technique that is now widely used in universities, research centers and laboratories.

From the use of light in optical microscopy to the use of the electron beam in the first electron microscopes, there is evidence of a conceptual, technological and industrial abyss that has brought notable benefits to society, especially in the field of health, whose progress will continue to be unveiled in the near future.

The collection

1. Optical Microscope / c. 1928 / Made by Ernst Leitz / Ocular lenses: 5X, 8X, and 16X / MUNCYT CE2025/001/0001.
2. RCA EMU-2A Transmission Electron Microscope / 1946 / Made by Radio Corporation of America (RCA) / Instituto de Optica “Daza de Valdés” (IO-CSIC) / Resolution: 10 nm ; Magnification: 100-20,000x ; Accelerating voltage: 50 kV / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE2009/015/0001
3. Record book of photographic glass negative produced with the RCA EMU-2A Transmission Electron Microscope between 1947 and 1965/ MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT Archive
4. Negative number: 1 / Date: 1947 / Sample: *Mycobacterium Leprae* / MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT Archive
5. Negative number: 41 / Date: 1949 / Sample: Óxido de Zinc / MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT Archive
6. Negative number: 599 / Date: 1957 / Sample: Réplica de arcillas / MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT
7. Negative number: 659 / Date: 1957 / Sample: Réplica de pechblenda Española / MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT Archive
8. Negative number: 681 / Date: 1957 / Sample: Virus de la gripe / MUNCYT CE2009/015/0001 / Image: MUNCYT Archive

9. TESLA BS 242A Transmission Electron Microscope / 1962 / Made by Technika Slaboproudová (TESLA) / Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz / Resolution: 3.5 nm ; Magnification: 1,000-30,000x; Accelerating voltage: 30-75 kV / Image: Yolanda Villaverde / MUNCYT CE1992/024/0001
10. Siemens Elmiskop 1A Transmission Electron Microscope / 1964 / Made by Siemens & Halske A. G. / Instituto de Óptica “Daza de Valdés” (IO-CSIC) / Resolution: 0.4 nm ; Magnification: 200,000x ; Accelerating voltage: 40-100 kV / In the image, from left to right: microscope, filament temperature controller, and power supply / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE2009/015/0002
11. JEOL JEM 200A Transmission Electron Microscope / 1972 / Made by Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) / On long-term loan from Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid / Resolution: 0.5 nm ; Magnification: 1,000-200,000x; Accelerating voltage: 50-200 kV / Image: José Latova / MUNCYT DO1995/031/0736
12. Hitachi HU 12A Transmission Electron Microscope / 1974 / Made by Hitachi Ltd. / Hospital Universitario 12 de Octubre de Madrid / Resolution: 0.2 nm ; Magnification: 500,000x; Accelerating voltage: 10-125 kV / Image: José Latova / MUNCYT CE2012/032/0001
13. JEOL JEM 100B Transmission Electron Microscope / c. 1978 / Made by Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) / Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CBM-CSIC-UAM) / Resolution: 0.2 nm ; Magnification: 500,000x ; Accelerating voltage: 20-100 kV / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE1993/002/0001
14. ISI SMS-2 Scanning Electron Microscope / 1974 / Made by International Scientific Instruments (ISI) / Real Jardín Botánico (RJB-CSIC) / Resolution: 7 nm ; Magnification: 30-160,000x ; Accelerating voltage: 2-25 kV / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE1996/026/0001
15. JEOL JSM-35C Scanning Electron Microscope / 1978 / Made by Japan Electron Optics Laboratory Co. Ltd. (JEOL) / Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid / Resolution: 10 nm ; Magnification: 10-180,000x ; Accelerating voltage: 0-39 kV / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE2009/012/0001
16. ISI SMS-2 Scanning Electron Microscope / 1981 / Made by International Scientific Instruments (ISI) / Real Jardín Botánico (RJB-CSIC) / Resolution: 4 nm ; Magnification: 500-200,000x ; Accelerating voltage: 30 kV / Image: Scope Producciones / MUNCYT CE2008/020/0001
17. Tunneling Electron Microscope / 1984 / Prototype made by IBM Laboratory at Rüschlikon, Zurich (Switzerland) / Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid / Lateral resolution: 0.2 nm ; Vertical resolution: 0.05 nm ; Tunneling current: 1 nA / Operating voltage: 0,001-10 V/ Image: Scope Producciones / MUNCYT CE2019/014/0001



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



MUNCYT
MUSEO NACIONAL DE
CIENCIA Y TECNOLOGÍA

